

겨울철 계절 예측 능력 향상을 위한 블로킹
역학 규명 및 예측성 연구

Dynamics and predictability study of mid-latitude
blocking for wintertime seasonal prediction



2018. 06. 30

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

(재)한국기상산업진흥원장 귀하

본 보고서를 “겨울철 계절 예측 능력 향상을 위한 블로킹 역학 규명 및 예측성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2018. 6. 30

연구 책임자 : 김 백 민

참 여 연 구 원 : 전 상 윤

“ : 조 미 현

“ : 홍 자 영

“ : 김 선 화

“ : 이 술 지

보고서 초록

과제관리번호	BSPN17040-030-5	해당단계 연구기간	2015.05.01.~ 2018.04.30	단계 구분	1단계 / 1단계
연구사업명	중 사업명	기상See-At기술개발사업			
	세부사업명	기후변화감시·예측 및 국가정책지원강화			
연구과제명	중 과제명	겨울철 기후예측 정확도 향상을 위한 중위도-열대 영향인자 기반 예측기술개발			
	세부(단위)과제 명	겨울철 계절 예측 능력 향상을 위한 블로킹 역학 규명 및 예측성 연구			
연구책임자	김 백 민	해당단계 참여연구 원수	총 : 8 명 내부 : 8 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 260,000 천원 기업: 0 천원 계: 260,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약				보고서 면수	88pp
<ul style="list-style-type: none"> ◦ 연구목적 - 한반도 겨울철 극한 기상 현상에 대한 중위도 블로킹의 영향을 파악하고 상세 역학 과정을 규명 - 블로킹-한파 관련성에 기반하여 극한 기후 예측성 향상에 필요한 역학 모형 활용 제반 기술을 개발 ◦ 필요성 - 최근 급변하고 있는 겨울철 기온 변동성의 근본 원인 파악과 예측성 확보를 위해 최근 역학연구의 경향을 반영하는 겨울 예측 과제개발이 필요함 ◦ 주요 연구내용 및 범위 - 한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해 - 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 1 - 역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석 - 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 2 - 지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석 - 한파 발생 및 강화 역학 이해 심화 ◦ 연구개발 결과 - 중위도 지역별 한파 발생 사례 수집 및 특성 비교 - 북미 지역 한파와 동아시아 한파 블로킹 강제력 특성 비교 분석 - 한파 발생과 관계된 극와도 순환 특징 분석 - 유라시아 블로킹과 대류권계면 접힘 관련성 분석 - 역학 모형에서의 블로킹 모의 특성 파악 - 블로킹과 관련된 한파 모의 성능 확인 - 중위도 블로킹 예측을 위한 최적 초기조건 앙상블 생성 연구 - 대류권계면 접힘과 시베리아 고기압 발달 관련성 분석 - 극와도 역전 기법을 적용한 대기 상-하층 간 상호작용 과정 분석 - 2015/16, 2016/17 겨울 블로킹 및 한파 특성 비교 평가 - 외부 강제력 변동에 따른 블로킹 발생 특성 분석 - 블로킹 역학 모의 시스템 평가 및 개선 - 한파 관련 최저기온 극기후값 분포에 대한 역학모형 모의 특성 분석 및 예측성 연구 - 블로킹 및 한파 발생 조건과 배경 기작 분석(Isentropic potential vorticity 분석) 					

<ul style="list-style-type: none"> - 2017/18년 겨울철 한파 예측 제시 및 평가 <ul style="list-style-type: none"> o 연구개발결과의 활용계획 - 한반도 겨울철 한파 역학에 대한 근본적인 이해를 통해 계절 예측성 향상을 위한 기반 확립 - 한반도 겨울철 한파 발생에 있어 중요한 주변 인자들에 대한 체계적 이해를 통해 계절 예측 사후분석 능력 향상 - 겨울철 극한 기상 현상에 대한 역학적 이해도 제고를 통해 극한 한파 발생 시 강도 예측 및 원인 분석에 활용 - 블로킹 등 겨울철 한파를 강화시키는 요인에 대한 계절 평균장 강제조건 분석을 통해, 한반도 악기상 빈도에 대한 계절 예측률 향상에 기여 - 북서태평양 블로킹의 역학적 기원을 이해하기 위해 향후 원격상관(Tele-connection)패턴과의 관계에 대한 심층 분석 연구가 필요 - 북반구 지역별 블로킹 특징 분석에서 더 나아가, 관측자료가 희박한 남극 지역에 대해서도 마찬가지로 적용할 수 있기 때문에, 다양한 탐지방법에 따른 남극 블로킹 특징 및 모델 모의 성능 비교 연구가 필요 - 여러 블로킹 탐지 코드 기술의 자체 보유로 인해 최신 기후모델의 북극-중위도 기후 모의 성능 검증과 개선에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대 - 기존 블로킹 탐지 방법들에 대한 단점 및 에러를 최소화시킨, 새로운 블로킹 탐지 코드를 향후 개발할 예정 		
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	한파, 블로킹, 계절 예측, 극와도, 시베리아 고기압
	영 어	Cold-surge, Blocking, Seasonal prediction, Polar vortex, Siberian High



요 약 문

I. 제 목

- 겨울철 계절 예측 능력 향상을 위한 블로킹 역학 규명 및 예측성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 목적
 - 한반도 겨울철 극한 기상 현상에 대한 중위도 블로킹의 영향을 파악하고 상세 역학 과정을 규명
 - 블로킹-한파 관련성에 기반하여 극한 기후 예측성 향상에 필요한 역학 모형 활용 제반 기술을 개발
- 필요성
 - 최근 동아시아 및 한반도의 겨울철 한파 역학 이해에 대한 패러다임이 변화하고 있는데, 과거 연구들에서는 시베리아 고기압의 확장/수축과 같은 지표 변동성에 주목하고 또한, 짧은 주기 (3한4온)의 시간 변동성에 주목하여 한파 역학을 이해해 온 반면, 최근 연구들은 500 hPa 이상 대기 변동성인 극소용돌이, 블로킹, 상층 정상파 등 보다 상층 시스템이 북풍 계열의 바람을 한반도에 유도하는 메커니즘에 주목하고 또한 시간적으로도 보다 긴 장주기 (일주일 이상~한달)적인 변동성에 초점을 맞추고 있음
 - 이러한 연구 패러다임의 변화는 기후변화에 따른 역학 시스템의 구조적인 변화에도 그 원인이 있으나, 그동안 동아시아 한파 이해에 있어 등한시되었던 요소들을 최근 연구자들이 규명해 내고 있기 때문임

- 그러나, 이러한 대부분 연구들이 국외저널들에 산발적으로 발표되고 있으며, 우리나라에서는 이러한 연구결과들을 겨울 예측성 향상 측면에서 활용한 과제가 개발되고 있지 못하고 있는 실정임. 최근 급변하고 있는 겨울철 기온 변동성의 근본 원인 파악과 예측성 확보를 위해 최근 역학연구의 경향을 반영하는 겨울 예측 과제개발이 요청되고 있음

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해
 - 중위도 지역별 한파 발생 사례 수집 및 특성 비교
 - 지역별 한파 및 블로킹 발생 기준 수립
 - 북미 지역 한파와 동아시아 한파 블로킹 강제력 특성 비교 분석
 - 관측, 재분석 자료 이용 통계 분석
- 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 1
 - 한파 발생과 관계된 극와도 순환 특징 분석
 - 중위도 대류권계면 접힘 기준 수립 및 빈도 분석
 - 유라시아 블로킹과 대류권계면 접힘 관련성 분석
 - 극와도 한파 사례 중첩 분석
- 역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석
 - 역학 모형에서의 블로킹 모의 특성 파악
 - 블로킹과 관련된 한파 모의 성능 확인
 - 역학 모형 내 극한 한파 모의 특성 조사
 - 중위도 블로킹 예측을 위한 최적 초기조건 앙상블 생성 연구
 - 앙상블 예측 실험
- 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 2
 - 대류권계면 접힘과 시베리아 고기압 발달 관련성 분석

- 극와도 역전 기법을 적용한 대기 상-하층 간 상호작용 과정 분석
 - 한파 발달에 관련된 상층 극와도 순환 기여도 정량화
- 2015/16, 2016/17 겨울 블로킹 및 한파 특성 비교 평가
- 지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석
- 외부 강제력 변동에 따른 블로킹 발생 특성 분석
 - 역학모형 지면조건 변화 실험
- 블로킹 역학 모의 시스템 평가 및 개선
- 한파 관련 최저기온 극기후값 분포에 대한 역학모형 모의 특성 분석 및 예측성 연구
 - 한파 관련 극한기온 빈도 통계 분석
- 한파 발생 및 강화 역학 이해 심화
- 블로킹 및 한파 발생 조건과 배경 기작 분석(Isentropic potential vorticity 분석)
 - 극와도 전이에 따른 한파 강화 메커니즘 분석
- 2017/18년 겨울철 한파 예측 제시 및 평가

IV. 연구개발결과

(1) 한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해

- 중위도 지역별 한파 발생 사례 수집 및 특성 비교
- 북극 온난화가 북미 한파를 강화시키는지의 여부를 조건부 선형회귀와 북극해 해수면온도 restoring 모형 실험을 통해 확인하고, 북극 온난화가 대기과동열의 경로를 변화시켜가며 북미 지역의 더 강한 한파 발달에 호조건을 형성시킴
- 북미 지역 한파와 동아시아 한파 블로킹 강제력 특성 비교 분석
- 중위도 대기과동열을 유발하는 강제력에 대해 북극 온난화의 영향이 어떻게 나타나는지를 스톱트랙의 변동을 분석함으로써 확인하였고,

스톱트랙의 위치는 양의 PDO와 북극 온난화 조건일 때, 평균적으로 남하하여 대기파동의 일시 와도 강제력(Transient vorticity forcing)으로 작용함

- 양의 PDO와 북극온난화가 동반되는 해에 스톱트랙 아노말리가 강한 지역에 와도 강제력을 삽입하였을 때, 관측 및 GFDL-CM2.1 모형 실험 결과와 아주 유사한 패턴의 파동열 변화가 나타남을 파악함

(2) 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 1

- 한파 발생과 관계된 극와도 순환 특징 분석
 - 장기 재분석 자료를 이용해 WACE 패턴이 인위적 요소에 의한 강제 패턴이 아닌, 순수 자연변동성에 의해 존재하는 대기 고유의 모드임을 밝혀냄
 - 우랄 블로킹을 증가시키는 대기 내부 모드들인 AO, WACE가 겨울철 계절내 평균장을 지배하는 해에 대한 합성도를 분석한 결과, 매해 서로 다른 대기 모드로 인해 우랄 블로킹과 관련된 한파가 발생함을 확인하였고, 최근에는 WACE 패턴의 강화로 인한 우랄 블로킹 발달 경향이 높아지고 있음을 파악함
 - 음의 북극진동과 양의 WACE 패턴이 강한 해에 발생하는 한파는 평년에 비해 오래 지속되는 특징을 보임
- 유라시아 블로킹과 대류권계면 접힘 관련성 분석
 - 대규모 대기 순환장 패턴이 한파 발생에 미치는 영향을 시베리아 고기압을 강화시키는 강제력 측면에서 분석한 결과, 음의 북극진동 패턴의 배경장을 나타내는 겨울에는 시베리아 고기압의 발달에 하층 한랭이류의 영향이 강함
 - 상층 와도 이류가 주도하는 시베리아 고기압의 팽창은 대류권 상층 패턴이 북대서양으로부터 전파하는 파동열 패턴일 때 뚜렷하게 나타났으며, 이 때 하부 성층권은 양의 북극진동 패턴을 나타낸 것을 파악함

(3) 역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석

- 역학 모형에서의 블로킹 모의 특성 파악
 - 기상청에서 제공하는 한·영 계절예측시스템(GloSea 5)의 과거 재현된 기후장(Hindcast)자료를 이용하여 블로킹이 어떻게 모의되고 있는지 살펴본 결과, 3개의 앙상블 평균된 자료에서 대서양 블로킹 빈도가 과소모의하고, 랍테프 해 주변으로 뚜렷한 감소가 나타남
 - 각각의 앙상블 멤버에 대한 블로킹 빈도 Climatology는 앙상블 모두를 평균한 결과에 비해서 좀 더 향상된 분포를 보였으며, 특히 첫 번째 앙상블 멤버가 가장 재분석 자료의 결과와 유사했음

- 블로킹과 관련된 한파 모의 성능 확인
 - 북극 해빙 감소가 WACE 패턴과 관련된 우랄 블로킹 발생을 변화시키는지에 대한 여부를 CAM3 모델을 이용해 실험한 결과, 북극 해빙 감소에 따른 대기 반응은 카라-바렌츠 해를 중심으로 warm air와 시베리아 지역을 중심으로 cold anomaly 분포를 보였으며, 이는 WACE 패턴과 아주 유사하였음
 - 해빙 감소로 인한 북극 온난화 발생 뿐만 아니라 상층 고기압 아노말리 형성과 동아시아 기압골 발달은 우랄 블로킹 발생환경에 최적의 조건임을 확인함

- 중위도 블로킹 예측을 위한 최적 초기조건 앙상블 생성 연구
 - 사용된 앙상블 멤버 수(39, 79, 159)에 따라 해빙감소에 따른 WACE index의 확률밀도함수(Probability Density Function) 분포가 달라졌으며, 앙상블 최대 개수(159)일 때, 가장 이상적인 결과를 얻음
 - 모델 실험에서 WACE index는 평균보다는 변동성 측면에서 변화가 다소 컸으며, 해빙이 감소했을 때 양(음)의 WACE 패턴 빈도가 더욱 증가(감소)함을 파악함

(4) 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 2

- 대류권계면 접힘과 시베리아 고기압 발달 관련성 분석

- 각 특정 시기별 WACE와 블로킹 빈도의 관계를 살펴본 결과, P1 (1930-1954), P3 (1980-2013) 시기에 WACE 패턴과 관련된 블로킹 빈도가 바렌츠/카라 해 부근에서 증가하는 반면, P0 (1901), P2(1955-1979) 시기에는 WACE 패턴과 관련된 블로킹 변동이 뚜렷하지 않은 특징이 나타남
 - 이러한 수십 년 주기의 우랄 블로킹 변동은 북대서양 지역 300hPa 남북풍(V300)의 두 번째 EOF(EV2)로 대표되는 순환장 패턴의 장주기 변동과 매우 높은 관련이 있음을 밝혀냄
 - 북대서양 지역 남북풍의 EV2 모드는 평균 대기경압성 및 스톰트랙 분포의 변동을 나타내며, 이에 따른 transient eddy vorticity flux의 차이는 이 지역에서 발달하는 파동열의 평균적인 위상 빈도에 영향을 미침. 즉, P1, P3 시기의 북대서양 지역 대기 평균장으로부터 발달하는 로스비파는 종종 바렌츠/카라 해 지역 블로킹의 발생 빈도를 증가시키는 위상으로 발달하는 반면, P0, P2 시기의 평균장으로부터 발달하는 로스비파는 바렌츠/카라 해 블로킹의 발달을 감소시키는 위상으로 발달하는 경우가 빈번함
 - 이 때 블로킹 빈도수의 차이는 P0-P3 각 시기별 시베리아 고기압과의 상호작용 강도에 영향을 미치는데, 블로킹-시베리아 고기압 상호작용이 강한 P1, P3 시기에는 전형적인 warm Arctic and cold Eurasia 패턴 구조가 나타남에 반해, 블로킹-시베리아 고기압 상호작용이 약한 P0, P2 시기에는 WACE 패턴의 구조가 전형적인 구조로 발달하지 못하는 특징을 갖게 됨
- 극와도 역전 기법을 적용한 대기 상-하층 간 상호작용 과정 분석
- 일반적으로 시베리아 고기압의 발달을 유발하는 원인으로 로스비 파열 (BO-like)과 북대서양 진동이 알려져 있는데, 본 연구에서는 두 순환장 구조(BO, NAO)에 따라 시베리아 고기압의 발달 지속 기간에 차이가 있음을 확인함
 - 시베리아 고기압의 발달과 관련된 대기 순환장 패턴이 BO-like 로스비 파열 구조일 때, 성층권 극와도 순환이 강해지는 특징이

나타남. 이러한 상층 순환장 조건은 시베리아 고기압 발달 시에 BO-like 로스비 파열을 통한 에너지 전파를 지속시키는 역할 뿐만 아니라, 강한 성층권 와도의 대류권 관입을 통해 시베리아 지역 상층의 저기압계의 발달 강도를 강화시킴으로써 시베리아 고기압의 발달 지속에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료됨

- 2015/16, 2016/17 겨울 블로킹 및 한파 특성 비교 평가
 - 2015/16년도 한겨울(12~2월) 북반구 블로킹 빈도는 우랄 지역에서 가장 높은 값 15.3%를 기록했으며, 이는 북반구 블로킹 climatology 분포와 상당히 다른 것으로, 상당히 특이한 경우의 해였던 것으로 파악됨
 - 2016/17년도 한겨울 최대 블로킹 빈도는 북반구 전체에서 북동태평양 지역이 30%로 매우 높게 발생하였고, 이곳은 일반적으로 저주기 에디(Low-frequency eddies) 변동성이 강한 지역으로, 이와 관련된 블로킹 발달이 활발히 일어나는 것으로 알려져 있음
 - 2015/16년도 한겨울 지상기온 분포는 척치 해와 카라/바렌츠 해를 포함하여 5°C이상의 높은 고온 현상을 보였고, 북미지역과 카자흐스탄/이란 지역, 동시베리아 지역에서 강한 한랭 아노말리 시그널이 나타났는데, 이는 전형적인 북극 온난화로 인한 Warm Arctic-Cold Continents 패턴임을 확인함
 - 일반적으로 Warm Arctic-Cold Continents 패턴과 우랄블로킹은 밀접한 관련성이 있으며, 이 때 우랄블로킹 발생시 보통 시베리아 지역을 포함한 동아시아 지역에 한파가 오는 것으로 알려져 있으나, 2015/16년 케이스는 이에 해당하지 않았음
 - 2016/17년도 지상기온의 지리적 분포도는 전반적으로 북미 동쪽 지역을 제외한 북반구 대륙전체에서 온난화 시그널이 나타났으며, 이러한 패턴은 특이해로 간주되며, 블로킹 영향으로 인한 한파 발생은 매우 미미한 것으로 사료됨

(5) 지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석

- 외부 강제력 변동에 따른 블로킹 발생 특성 분석
 - 전지구기후모델(CESM-CAM5)을 이용하여 현재기후에서 서로 다른 역학코어(유한체적법, 분광요소법)로 외부 강제력을 적용했을 때, 두 실험 모두 블로킹 발생일이 태평양은 과대모의였으며, 대서양은 과소모의함. 특히 분광요소법(Semi-Element core)에서 블로킹 빈도 바이어스가 더 크게 나타났음
 - CESM-CAM5모델에 Unified Convection scheme(UICON) 스킴을 적용하여 블로킹 발생 민감도 차이 실험한 결과, 물리모수화를 다르게 적용했을 때, 대서양보다 태평양에서 뚜렷한 과대모의를 확인하였고, 이는 대류와 관련된 태평양 평균장 바이어스가 증가한 것으로 사료됨

- 블로킹 역학 모의 시스템 평가 및 개선
 - 재분석 자료를 이용하여 다양한 블로킹 탐지방법(아노말리 방법, 로컬 역전 방법, 대규모 역전 방법, 하이브리드 방법)으로 동일한 탐지 알고리즘을 적용하여 블로킹 빈도 Climatology를 살펴본 결과, 아노말리 근거 방법(하이브리드, 아노말리 방법)은 날짜경계선을 기준으로 서쪽에 치우쳐져 있고, 역전 근거 방법(로컬 역전, 대규모 역전 방법)은 반대로 동쪽에 치우쳐짐. 즉, 처음에 어떤 필드(아노말리 혹은 역전)를 선택하는 지에 따라 블로킹 발생 선호 지역이 달라질 수 있음을 밝혀냄
 - 이렇게 서로 다른 정의로 탐지한 블로킹 방법들 중에서 가장 북반구에서 큰 차이를 나타낸 지역은 캄차카 반도를 중심으로 한, 북서태평양 지역이며, 특히 아노말리 근거 방법들에서는 북서태평양 지역에서 블로킹 빈도가 매우 낮은 반면, 역전 근거 방법들에서는 최고 빈도가 14%이상을 기록함
 - 어떤 탐지 방법을 선택하느냐에 따라, 북서태평양에서 탐지되는 블로킹 빈도가 매우 달라질 수 있으며, 앞으로 특정 지역에 대해 블로킹을 분석할 때는 해당 지역 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 탐지 방법으로 연구해야 할 중요성을 제시함

- 한파 관련 최저기온 극기후값 분포에 대한 역학모형 모의 특성 분석 및 예측성 연구
- 다양한 블로킹 탐지 방법에 따른 동아시아-북태평양 한파 특성을 살펴보기 위해, 북서태평양지역에서 블로킹이 발생했을 때의 대기 순환장에 관한 합성도를 실시한 결과, 중층 지위고도의 절대 필드(absolute field)는 저기압성 순환의 파동(cyclonic waviness)을 형성하고, 아노말리 필드(anomaly field)는 High-over-Low 구조를 나타냄
- 4가지 방법 모두 북서태평양 블로킹이 발생했을 때, 캄차카 반도를 중심으로 양의 지상기온 아노말리가 유의하게 나타나고 있으며, 블로킹으로 인해 깊어진 동아시아 기압골은 시베리아 고기압의 발달과 연관되어 한랭 아노말리가 강하게 나타나는데, 이는 잠재적 동아시아 한파 및 악기상 발생을 야기시킬 수 있는 중요한 요소로 파악됨

(6) 한파 발생 및 강화 역학 이해 심화

- 블로킹 및 한파 발생 조건과 배경 기작 분석(Isentropic potential vorticity 분석)
- 2014년 2월 5일에 발생(onset)했던 북서태평양 블로킹은 23일 동안 지속되었는데, 이 때 블로킹이 발생하기 하루 전부터 북서태평양 및 캄차카 지역에 오메가 형태의 파동이 뚜렷하게 나타났으며, 그 중 블로킹 발생일에 cyclonic Rossby wave breaking이 뚜렷하게 나타났음
- 2018년 1월 23일에 한파가 발생하였으며, 이는 5일 동안 지속되었는데, 한파 발생 하루 전부터 고위도로부터 한랭한 기류의 이동이 있었으며, 한파 발생일에 북서태평양 지역에서 cyclonic Rossby wave breaking이 크게 나타났고, 한파 발생 5일 후까지 강한 잠재와도가 한반도 북서쪽에 지속적으로 존재하는 것을 확인함
- 2017/18년 겨울철 한파 예측 제시 및 평가
- 극지연구소의 기후예측시스템의 모델결과는 재분석자료 보다 따듯할

것으로 예측하였지만, 2017년 12월의 경우 한반도 동쪽은 춥고 서쪽은 따뜻하며, 2018년 1월과 2월은 북쪽이 춥고 남쪽은 따뜻할 것으로 예측하였는데, 이는 재분석 자료의 결과와 상당히 유사했음

- 무엇보다 절대적인 온도 아노말리 크기의 예측보다는 공간적인 패턴 예측 측면에서 좋은 성능을 보였음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 한반도 겨울철 한파 역학에 대한 근본적인 이해를 통해 계절 예측성 향상을 위한 기반 확립
- 한반도 겨울철 한파 발생에 있어 중요한 주변 인자들에 대한 체계적 이해를 통해 계절 예측 사후분석 능력 향상
- 겨울철 극한 기상 현상에 대한 역학적 이해도 제고를 통해 극한 한파 발생 시 강도 예측 및 원인 분석에 활용
- 블로킹 등 겨울철 한파를 강화시키는 요인에 대한 계절 평균장 강제조건 분석을 통해, 한반도 악기상 빈도에 대한 계절 예측률 향상에 기여
- 북서태평양 블로킹의 역학적 기원을 이해하기 위해 향후 원격상관(Tele-connection)패턴과의 관계에 대한 심층 분석 연구가 필요
- 북반구 지역별 블로킹 특징 분석에서 더 나아가, 관측자료가 희박한 남극 지역에 대해서도 마찬가지로 적용할 수 있기 때문에, 다양한 탐지방법에 따른 남극 블로킹 특징 및 모델 모의 성능 비교 연구가 필요
- 여러 블로킹 탐지 코드 기술의 자체 보유로 인해 최신 기후모델의 북극-중위도 기후 모의 성능 검증과 개선에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대
- 기존 블로킹 탐지 방법들에 대한 단점 및 에러를 최소화시킨, 새로운 블로킹 탐지 코드를 향후 개발할 예정

S U M M A R Y

1. Subject

- Dynamics and predictability study of mid-latitude blocking for wintertime seasonal prediction

2. Objectives and necessities of the study

- Objectives
 - Understand the governing dynamics of midlatitude blocking that affects extreme weather events over Korea peninsula during winter
 - Develop basic technical application of dynamic model to understand extreme climate variability and enhance predictability based on blocking-cold surge relationship
- Necessities
 - Recently, the paradigm for the understanding of wintertime cold surge dynamics in East Asia and Korean peninsula is changing, previous studies have focused on surface variability such as expansion/contraction of the Siberian high and have also understood the short periodic fluctuation(3 days cold and 4 days warm) of the cold surge dynamics, but recent studies have shown the mechanisms by which the upper-level systems(polar vortex, 500 hPa blocking, stationary waves) induce winter monsoon changes, and its longer variability(more than a week to a month)
 - This change in the research paradigm is attributable to structural changes in the dynamic system due to climate change, but many researchers have revealed factors that have been neglected in the understanding of cold surges in East Asia

- However, most of these studies have been sporadically published in international journals, and in Korea, there have been no research project developments in the use of these results in terms of improving the wintertime seasonal prediction. It is required to develop research project reflecting the tendency of recent dynamic studies in order to obtain the causes and predictability of winter temperature variability changes

3. Outcome of the study

(1) Understanding of Cold Surge Generation and Mid-latitude Blocking Relevance

- Collection of midlatitude regional cold surge cases and its characteristic comparison
- Conditional linear regression and Arctic Sea Surface Temperature restoring model test confirmed whether the Arctic warming strengthens the cold surge in North America and Arctic warming changes the path of Rossby wave and forms a favorable condition for the stronger cold surge development in the North America
- Comparison analysis of forcing characteristics of blocking-cold surge in the North American and East Asia
- The effect of Arctic warming on the midlatitude Rossby wave paths was confirmed by analyzing the fluctuation of the storm track, the position of the storm track shifted south and it acts as transient vorticity forcing in the case of positive PDO and Arctic warming conditions
- When strong region of storm track anomalies were inserted to vorticity forcing in the year of positive PDO and Arctic warming, the wave train patterns was very similar to the observed and

GFDL-CM2.1 model results

(2) Understanding of Cold Surge Generation Dynamics through Polar Vortex Analysis 1

- Analysis of polar vortex characteristics in association with cold surge outbreak
 - Using long-term reanalysis data, WACE pattern is intrinsic internal mode by natural variability, and is not forced mode by anthropogenic factors
 - Composite analysis reveals that cold surge related Ural blocking occurs due to different atmospheric modes(AO or WACE) each year
 - In the strong years of negative AO and positive WACE pattern, cold surge lasts longer than climatology
- Analysis of Eurasian blocking-tropopause folding relationship
 - When the negative AO is strong, the influence of low-level cold advection is strong with the intensified Siberian high
 - expansion of Siberian high, which is dominated by the upper vorticity advection, is evident when the wave train pattern was propagated from the North Atlantic and lower stratosphere shows a positive AO pattern

(3) Analysis of Blocking Simulation using Numerical Model

- Evaluation of numerical model performance on atmospheric blocking
 - Evaluate how the blocking is simulated using Hindcast data of GloSea5 data provided by KMA
 - The blocking climatology for each ensemble member shows a more improved distribution than the average of all ensembles

- Evaluation of numerical model performance on cold surge related to blocking
- CAM3 model showed that the atmospheric response to Arctic sea ice reduction was cold anomaly distribution in warm air and Siberia centered on the Kara-Barents Sea, very similar to the WACE pattern
- In addition to the arctic warming caused by the decrease in sea ice, the formation of upper anticyclonic anomaly and the development of East Asia trough are optimal conditions for the occurrence of Ural Blocking
- Study on Optimal Initial Condition Ensemble Generation for Mid-latitude Blocking Prediction
- According to the number of ensemble members (39, 79, 159), the distribution of Probability Density Function of WACE index due to sea ice reduction was changed

(4) Understanding of Cold Surge Generation Dynamics through Polar Vortex Analysis 2

- Analysis of Siberian High-tropopause folding relationship
- The interdecadal variability of Ural blocking frequency is highly correlated with the long-term variation of the circulation pattern represented by the second EOF (EV2) of the North Atlantic 300 hPa meridional wind (V300)
- The EV2 mode shows the variation of averaged atmospheric baroclinicity and storm track distribution, and the difference in transient eddy vorticity flux affects the average phase frequency of the Rossby wave developed in this region.
- Analysis of atmospheric upper-lower interaction using polar vortex

reversal

- there is a difference in duration of Siberian high development according to the two circulation structures(BO, NAO)
- When the circulation field related to the development of the Siberian High is BO-like pattern, it is characterized by stronger stratospheric circulation

- Diagnosis of 2015/16 to 2016/17 boreal winters cold surge events
- The Northern Hemisphere blocking frequency in the mid-winter 2015/16 was the highest in the Ural region at 15.3%, which is significantly different from the northern blocking climatology distribution
- In the winter of 2015/16, the surface air temperature showed a high temperature phenomenon of over 5 °C including the Chuchi River and the Kara / Barents Sea, and a strong cold anomaly signal appeared in North America, Kazakhstan / Iran and East Siberia, Warm Arctic-Cold Continents pattern due to typical Arctic warming
- The Warm Arctic-Cold Continents pattern is closely related to Ural Blocking, and it is known that when Ural blocking occurs, there is usually a cold wave in East Asia including Siberia, but the case of 2015/16 did not

(5) Analysis of Boundary Condition Impacts on Blocking Development and Variability of Extreme Climate Events

- Analysis of the blocking due to external forcing
- When external forcing were applied with different dynamic cores (finite volume method, spectroscopic element method), the blocking overestimates in the Pacific Ocean, and underestimates in Atlantic Ocean
- Evaluation and improvement of blocking dynamics simulation

system

- same detection algorithm was applied to various blocking detection methods (anomaly, local reversal, large-scale reversal, hybrid method) using reanalysis data, and then largest difference of blocking frequency was observed in the western North Pacific region
- Study of the model characteristics and predictability of the extreme event related to cold surge
- From the composite analysis of atmospheric circulation during western Pacific blocking, absolute field of geopotential height shows cyclonic waviness, and its anomaly field indicates High-over-Low structure

(6) Deep Understanding of Cold Surge Generation and Strengthening Mechanisms

- Analysis of blocking-cold surge generation mechanism(Isentropic potential vorticity analysis)
- The western Pacific blocking that was onset on February 5, 2014 lasted for 23 days, when omega-shaped waves appeared in the western Pacific and Kamchatka areas from the day before the blocking onset, Cyclonic Rossby wave breaking were distinct at work
- Diagnosis of 2017/18 boreal winters cold surge events
- The climate model predictions of the Korea Polar Research Institute would be warmer than the reanalysis data, but predicted that in December 2017, the east of the peninsula would be cold and the west would be warm and January and February 2018 would be cold north and warm south, Which was quite similar to the results of the reanalysis data

C O N T E N T S

Abstract	ii
Summary (Korean)	iv
Summary	xiv
Contents	xx
Contents (Korean)	xxii
Chapter 1. Introduction	1
Section 1.1 Background and Necessity	1
Section 1.2 Objectives and Scope	2
Chapter 2. Status of Technological Development at Home and Abroad	5
Section 2.1 Technological Development Status at Home	5
Section 2.2 Technological Development Status at Abroad	5
Chapter 3. Contents and Results of Research	6
Section 3.1 Understanding of Cold Surge Generation and Mid-latitude Blocking Relevance	6
Section 3.2 Understanding of Cold Surge Generation Dynamics through Polar Vortex Analysis 1	8
Section 3.3 Analysis of Blocking Simulation using Numerical Model	13
Section 3.4 Understanding of Cold Surge Generation Dynamics through Polar Vortex Analysis 2	18
Section 3.5 Analysis of Boundary Condition Impacts on Blocking Development and Variability of Extreme Climate Events	26
Section 3.6 Deep Understanding of Cold Surge Generation and Strengthening Mechanisms	36
Chapter 4. Achievement of Goals and External Contributions	39
Chapter 5. Plans for Utilization of Results	41
Chapter 6. Overseas Scientific Information Gathered in Research	42
Chapter 7. References	44

Appendix A. Main code of Hybrid method for Blocking detection	48
Appendix B. Main code of Anomaly method for Blocking detection	55
Appendix C. Main code of Local reversal method for Blocking detection	62
Appendix D. Main code of Large-scale reversal method for Blocking detection	69
Appendix E. partial code of Local reversal detection for Local reversal method	76
Appendix F. partial code of Large-scale reversal detection for Large-scale reversal method	79
Appendix G. Code of Blocking Central Latitude detection for Large-scale reversal method	82



목 차

보고서 초록	ii
요약문	iv
Summary	xiv
Contents	xx
목차	xxii
제 1 장 서론	1
1.1 배경 및 필요성	1
1.2 목적 및 연구 범위	2
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
2.1 국내 기술개발 현황	5
2.2 국외 기술개발 현황	5
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	6
3.1 한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해	6
3.2 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 1	8
3.3 역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석	13
3.4 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 2	18
3.5 지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석	26
3.6 한파 발생 및 강화 역학 이해 심화	36
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	39
제 5 장 기술개발 결과 활용계획	41
제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술 정보	42
제 7 장 참고문헌	44
부록A. 블로킹 탐지를 위한 하이브리드 방법의 메인 코드	48
부록B. 블로킹 탐지를 위한 아노말리 방법의 메인 코드	55
부록C. 블로킹 탐지를 위한 로컬 역전 방법의 메인 코드	62
부록D. 블로킹 탐지를 위한 대규모 역전 방법의 메인 코드	69
부록E. 로컬 역전 방법의 로컬 역전을 탐지하는 일부 코드	76

부록F. 대규모 역전 방법의 대규모 역전을 탐지하는 일부 코드 79
부록G. 대규모 역전 방법 이용을 위한 블로킹 위도 탐지하는 코드 82



The image features a large, light blue watermark of the KOPRI logo. The logo consists of the letters 'KOPRI' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or wave graphic underneath. Below the globe, the Korean text '극지연구소' (Korea Polar Research Institute) is written in a smaller, sans-serif font.

제 1 장 서론



제 1 장 서론

1.1 배경 및 필요성

- 최근 한반도 겨울철은 계절 변동성이 확대되고 있으며, 이는 블로킹과 같은 한반도 주변의 대규모 대기 파동의 변동성 확대와 직접적인 관련이 있다. 본 연구에서는 한반도 주변 겨울철 블로킹 변동성의 특징을 파악하고, 블로킹과 한파 관련성을 역학적으로 이해함을 일차적인 목표로 하고, 궁극적으로는 역학 모델을 이용한 블로킹 예측 가능성 향상에 필요한 제반 기술들을 개발/검증하고자 한다.
- 금세기 북반구 겨울철 중위도 대기 변동성이 점차 확대되고 있으며, 이는 극소용돌이의 이상난동과 관련이 있음이 밝혀지고 있다. 최근 북미에서는 극소용돌이 이상난동으로 인해 2년 연속 극한 한파가 발생하였으며, 이로 인한 경제적 피해는 매년 5조원 이상으로 추정되고 있으며, 직접적인 사망자만 연간 40명 이상 발생하는 등 극심한 피해를 받고 있는 것으로 확인되고 있다. 그러나, 겨울철 예측은 과거와는 다른 형태의 대기 변동성의 확대로 인해 예측 정확도가 떨어지고 있다.
- 겨울철 계절 예측은 기상/기후 산업적 측면에서 그 중요성이 부각되고 있다. 미국의 경우, 냉난방도일 (Cooling/Heating Degree Days)와 같은 지수가 미국 선물시장 CME에 상장되어 있어, 이에 대한 예측정보가 거래되고 있어 다양한 형태의 급증하는 기상 리스크에 대응하고 있다. 점차 확대되고 있는 대기 변동성의 특징과 중위도 아열대 제트와 극제트 사이에 있어 급변하는 대기 변동성의 영향을 심하게 받는 대한민국의 지정학적 위치를 고려할 때, 이러한 기상 리스크에 대비하지 않으면 최근 북미에서 발생한 겨울철 극한 한파 리스크에 국가적으로 대응하는 것이 매우 힘들어지고, 이는 다른 관련 산업 전반에 걸친 피해로 나타나게 될 것이다. 따라서, 이러한 리스크에 대비하는 가장 기초적인 겨울철 계절 예측능력 확보가 시급한 실정이다.
- 최근 동아시아 및 한반도의 겨울철 한파 역학 이해에 대한 패러다임이 변화하고 있다. 과거 연구들에서는 시베리아 고기압의 확장/수축과 같은 지표 변동성에 주목하고 또한, 짧은 주기 (3한4온)의 시간 변동성에 주목하여 한파 역학을 이해해 온 반면, 최근 연구들은 500 hPa 이상 대기 변동성인 극소용돌이, 블로킹, 상층 정상과

등 보다 상층 시스템이 북풍 계열의 바람을 한반도에 유도하는 메커니즘에 주목하고 또한 시간적으로도 보다 긴 장주기 (일주일 이상~한달)적인 변동성에 초점을 맞추고 있다. 이러한 연구 패러다임의 변화는 기후변화에 따른 역학 시스템의 구조적인 변화에도 그 원인이 있으나, 그동안 동아시아 한파 이해에 있어 등한시되었던 요소들을 최근 연구자들이 규명해 내고 있기 때문이다. 그러나, 이러한 대부분 연구들이 국외저널들에 산발적으로 발표되고 있으며, 우리나라에서는 이러한 연구결과들을 겨울 예측성 향상 측면에서 활용한 과제가 개발되고 있지 못하고 있는 실정이다. 최근 급변하고 있는 겨울철 기온 변동성의 근본 원인 파악과 예측성 확보를 위해 최근 역학연구의 경향을 반영하는 겨울 예측 과제개발이 요청되고 있다.

1.2 목적 및 연구 범위

1.2.1 연구 개발 목표

- 연구개발의 최종목표
 - 한반도 겨울철 극한 기후 현상에 대한 중위도 블로킹의 영향을 파악하고 상세 역학 과정을 규명
 - 블로킹과 한파 관련성에 기반하여 극한 기후 예측성 향상에 필요한 역학 모형 활용 제반 기술을 개발

1.2.2 연구 개발 내용 및 범위

구분	연도	연구개발의 목표	연구개발의 내용	연구범위
1차년도	2015	한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해	<ul style="list-style-type: none"> - 중위도 지역별 한파 발생 사례 수집 및 특성 비교 - 북미 지역 한파와 동아시아 한파 블로킹 강제력 특성 비교 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 지역별 한파 및 블로킹 발생 기준 수립 - 관측, 재분석 자료 이용 통계 분석
		극과도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해	<ul style="list-style-type: none"> - 한파 발생과 관계된 극과도 순환 특징 분석 - 유라시아 블로킹과 대류권 계면 접힘 관련성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 중위도 대류권계면 접힘 기준 수립 및 빈도 분석 - 극과도 한파 사례 중첩 분석
2차년도	2016	역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 역학 모형에서의 블로킹 모의 특성 파악 - 블로킹과 관련된 한파 모의 성능 확인 - 중위도 블로킹 예측을 위한 최적 초기조건 앙상블 생성 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 역학 모형 내 극한 한파 모의 특성 조사 - 앙상블 예측 실험
		극과도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 (계속)	<ul style="list-style-type: none"> - 대류권계면 접힘과 시베리아 고기압 발달 관련성 분석 - 극과도 역전 기법을 적용한 대기 상-하층 간 상호작용 과정 분석 - 2015/16, 2016/17 겨울 블로킹 및 한파 특성 비교 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 한파 발달에 관련된 상층 극과도 순환 기여도 정량화

3차년도	2017	<p>지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 외부 강제력 변동에 따른 블로킹 발생 특성 분석 - 블로킹 역학 모의 시스템 평가 및 개선 - 한파 관련 최저기온 극기후값 분포에 대한 역학모형 모의 특성 분석 및 예측성 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 역학모형 지면조건 변화 실험 - 한파 관련 극한기온 빈도 통계 분석
		<p>한파 발생 및 강화 역학 이해 심화</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 블로킹 및 한파 발생 조건과 배경 기작 분석 (Isentropic potential vorticity 분석) - 2017/18년 겨울철 한파 예측 제시 및 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 극와도 전이에 따른 한파 강화 메커니즘 분석



The image features a large, light blue watermark of the KORPIA logo in the background. The logo consists of the word 'KORPIA' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or network diagram below it. The text '제 2 장 국내외 기술개발 현황' is centered over this watermark.

제 2 장 국내외
기술개발 현황



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내 기술개발 현황

- 세계적 수준의 80%. 국내 연구진들의 동아시아 한파에 관한 연구 수준은 최근들어 급격히 향상되고 있으며, 연구 역량에 있어서는 세계적 수준이라고 판단된다. 다만, 연구 인력이 부족하고, 인프라 측면에서 아직 독자 예측 모델이 없는 약점이 있다.
- 극지연구소는 성층권의 가영이 시베리아 고기압의 발달 여부와 밀접한 관련이 있음을 역학적으로 규명하였다.
- 서울대학교는 적도 적운대류와 한파와의 관련성을 통계적으로 분석하였다. 또한, 극진동과 한파의 관련성에 대한 통계적 특성을 분석하고, 북극권 기후변화에 따른 동아시아 겨울몬순을 예측하였다.
- 공주대학교는 한파의 열역학적 특징을 분석하였다.

2.2 국외 기술개발 현황

- 영국 MetOffice는 계절예측을 현업에 활용하고 있으며, 성층권 역학 적용과 계절예측에 있어서의 해빙자료 초기화에 의한 대기-해양 접합 모형을 활용하고 있다.
- 캐나다 환경부는 대기-해양-토양 접한 모형의 앙상블에 의한 계절예보 및 재예보(reforecast)를 하고 있다.
- 일본 기상청은 영국 MetOffice와 동일하게 계절예측을 현업에 활용하고 있으며, 해빙고정 실험 등에 의한 북극권 온난화에 활용하고 있다.



제 3 장 연구개발 수행
내용 및 결과



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3.1 한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해

3.1.1 중위도 지역별 한파 발생 사례 수집 및 특성 비교

- 중위도 지역 한파에 영향을 미치는 인자를 동아시아와 북미 지역으로 나누어 분석하였다.
- 북태평양 해양 장주기 순환인 PDO가 북미 지역의 추위를 가져오는 대기 모드와 연관됨이 선행연구에서 알려져 있다 (Mantua and Hare, 2002).
- 북극 온난화가 북미 한파를 강화시키는지의 여부를 조건부 선형회귀 (Fig. 3.1.1)와 북극해 해수면온도 restoring 모형 실험을 통해 확인하였다.
- 북극온난화가 대기과동열의 경로를 변화시키며 북미 지역의 더 강한 한파 발달에 호조건을 만든다.

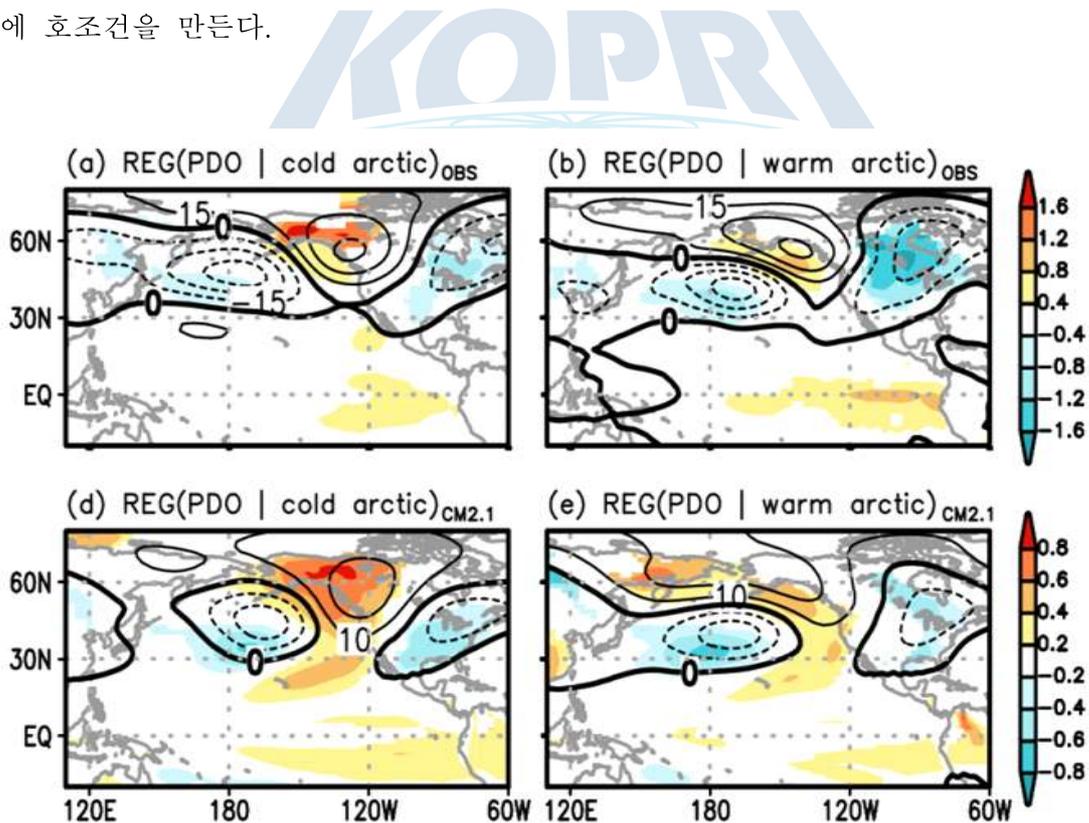


Fig. 3.1.1 PDO인덱스에 선형회귀된 지상기온(채색)과 300hPa 지위고도장(등치선). 척치해 지역이 각각 추운 해(좌), 온난한 해(우)(위: 관측, 아래: CM2.1 모형 실험 결과)

3.1.2 북미 지역 한파와 동아시아 한파 블로킹 강제력 특성 비교 분석

- 중위도 대기파동열을 유발하는 강제력에 북극 온난화의 영향이 어떻게 나타나는지를 스톱트랙의 변동을 분석함으로써 확인하였다.
- 스톱트랙의 위치는 양의 PDO와 북극 온난화 조건일 때 평균적으로 남하하여, 대기 파동의 와도 강제력(Transient vorticity forcing)으로 작용하였다 (Fig. 3.1.2).

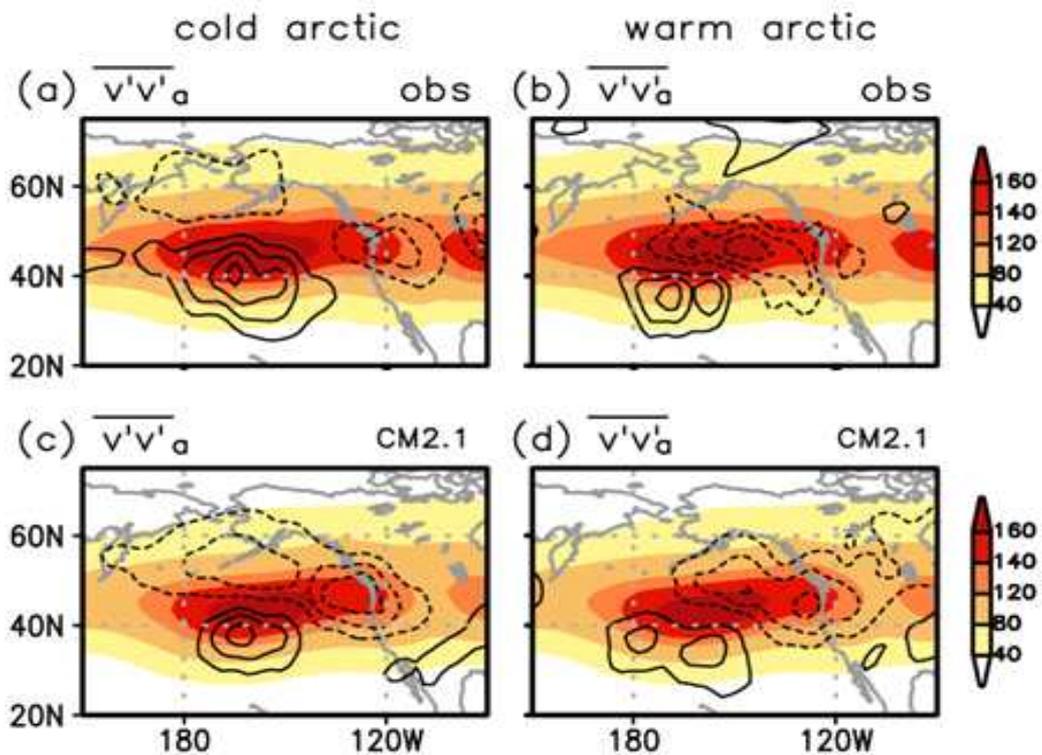


Fig. 3.1.2 스톱트랙의 평년장(채색)과 북극 온난화 및 PDO와 관련된 어노말리(등치선).

- 양의 PDO와 북극온난화가 동반되는 해의 스톱트랙 아노말리 지역에 와도 강제력을 삽입하였을 때 관측 및 GFDL-CM2.1 모형 실험 결과와 아주 유사한 패턴의 파동열 변화가 나타남을 확인하였다 (Fig. 3.1.3).
- 본 연구결과는 Sung et al. (2016)로 공식적인 논문으로 출판되었다.

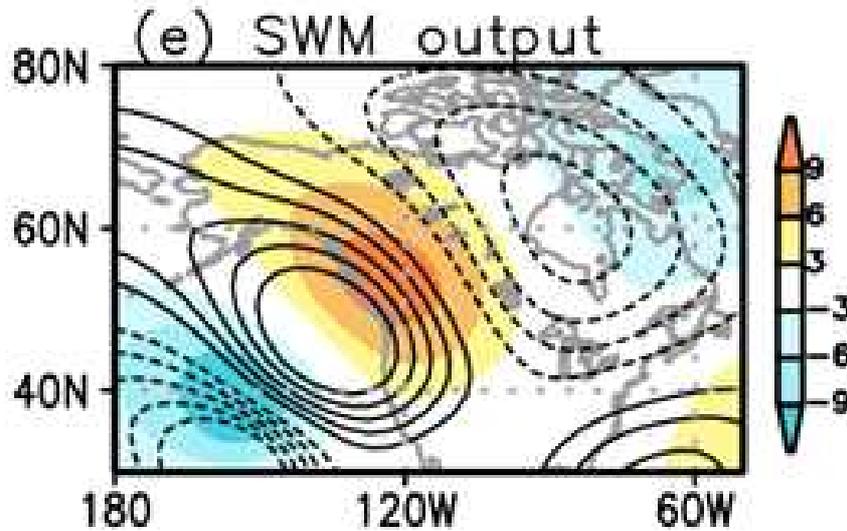


Fig. 3.1.3 Stationary Wave Model에 와도 강제력을 다르게 삽입한 대기과동 반응.



3.2 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해1

3.2.1 한파 발생과 관계된 극와도 순환 특징 분석

○ Mori et al. (2014)에서 Warm Arctic Cold Eurasia (WACE) 패턴이 북극해 해빙에 의해 강제된 패턴이며, 블로킹의 증가를 동반하는 패턴임을 제시하였다. 본 연구에서는 20th-century reanalysis 장기 재분석 자료(Compo et al., 2011)를 이용해 WACE 패턴이 인위적인 요소에 의한 강제 패턴이 아닌, 순수 자연변동성에 의해 존재하는 대기 고유의 모드임을 밝혀내었다 (Fig 3.2.1).

○ 우랄 블로킹을 증가시키는 대기 내부 모드들인 Arctic Oscillation(AO; Thompson and Wallace 1998), WACE가 겨울철 계절내 평균장을 지배하는 해에 대한 합성도를 분석한 결과, 매해 서로 다른 대기 모드들로 인해 우랄 블로킹과 관련된 한파가 발생함을 확인하였고, 최근에는 WACE 패턴의 강화로 인한 우랄 블로킹 발달 경향이 높아지고 있다 (Fig 3.2.2).

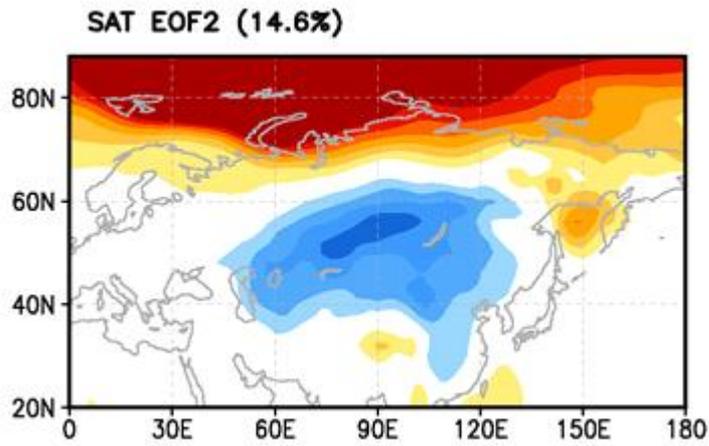


Fig. 3.2.1 20CR 재분석자료를 통해, 1901-2013년 기간동안의 겨울철 유라시아 지역의 WACE EOF 패턴.

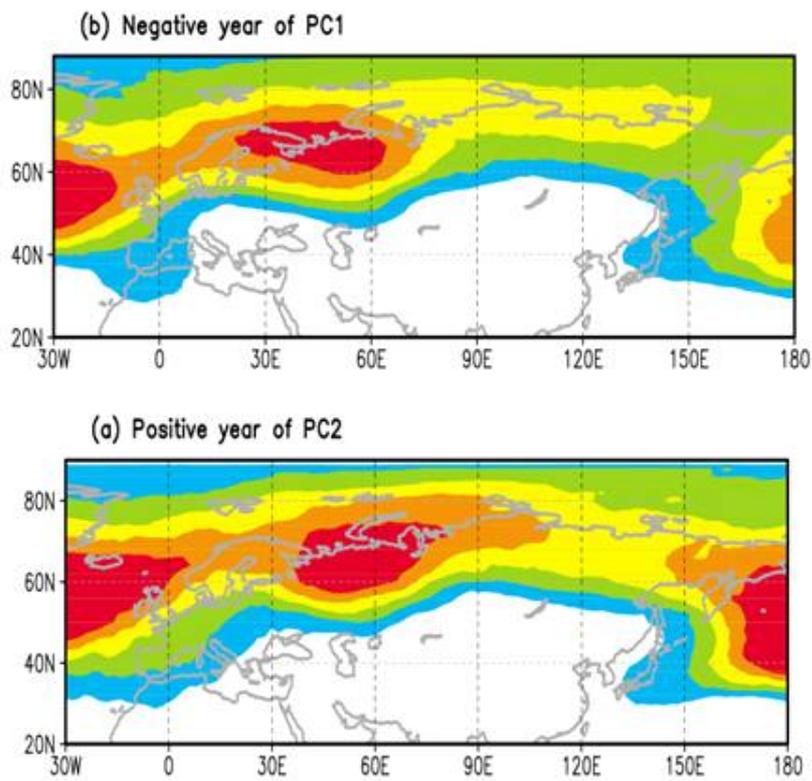


Fig. 3.2.2 Arctic Oscillation (AO)이 음의 위상일 때와(위), Warm Arctic Cold Eurasia (WACE) 패턴이 양의 위상일 때의(아래) 겨울철 블로킹 빈도 합성도.

○ 음의 북극진동과 양의 WACE 모드가 강한 해에 발생하는 한파는 평년에 비해 오래 지속되는 특징을 확인하였다 (Fig. 3.2.3). 이는 두 시기의 배경장에 따라 시베리아 고기압을 강화시키는 주요 기작이 달라지기 때문이다.

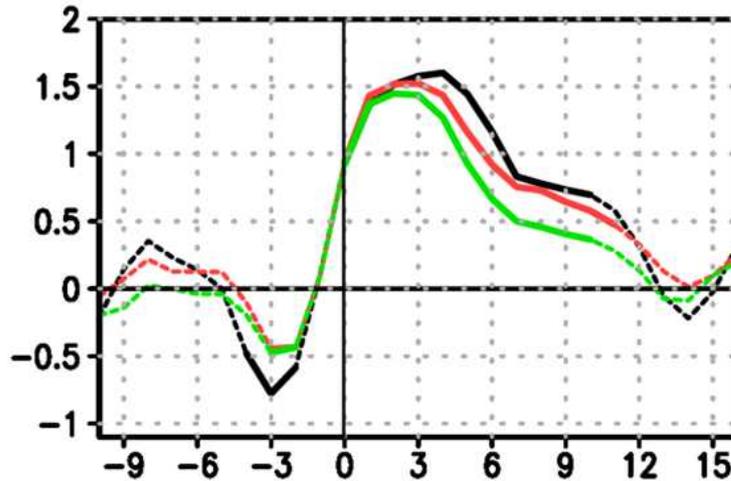


Fig. 3.2.3 동아시아 한파 발생의 지속 기간. (검정실선: 음의 북극진동 해, 빨강 실선: 양의 WACE 해, 녹색 실선: 북극진동과 WACE 강도가 약한 해)

극지연구소

3.2.2 유라시아 블로킹과 대류권계면 접힘 관련성 분석

○ 선행연구 결과(Takaya and Nakamura 2005)에 근거하여, 대규모 대기 순환장 패턴이 한파 발생에 미치는 영향을 시베리아 고기압을 강화시키는 강제력 측면에서 분석하였다 (하층 한랭 이류와 상층 와도 이류).

○ 음의 북극진동 패턴의 배경장을 나타내는 겨울에는 시베리아 고기압의 발달에 하층 한랭이류의 영향이 강하였다 (Fig. 3.2.4).

○ 상층 와도 이류가 주도하는 시베리아 고기압의 팽창은 대류권 상층 패턴이 북대서양으로부터 전파하는 파동열 패턴일 때 뚜렷하게 나타났고, 이 때 하부 성층권은 양의 북극진동 패턴을 나타내었다 (Fig 3.2.5).

○ 대규모 대기 순환장 조건에 따라 동아시아 한파의 특징이 달라지는 이유는 우랄블로킹의 발달과 하부성층권 와도장의 상호작용과 관련이 있을 것으로 추정된다 (Fig. 3.2.6).

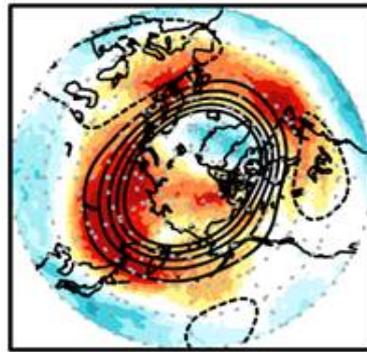
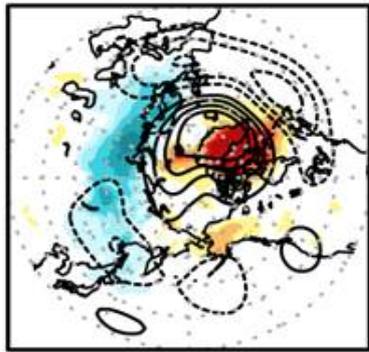
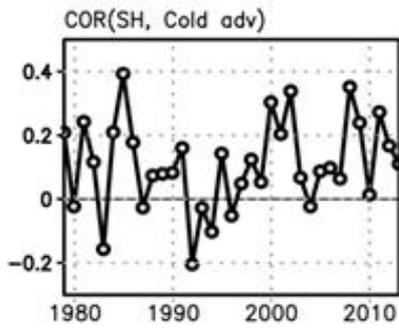


Fig. 3.2.4 (위) 하층 한랭 이류와 시베리아 고기압의 상관계수. (아래) 하층 온도 이류와 시베리아 고기압의 상관관계가 강화되는 해의 대기순환장 패턴. (왼쪽) 지상 기온 어노말리(채색), 300hPa 지위고도(등치선) (오른쪽)

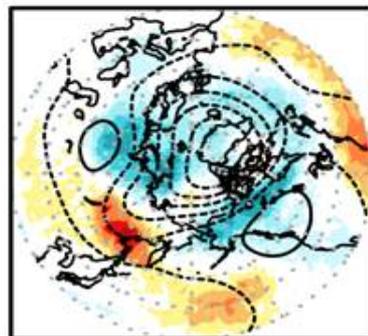
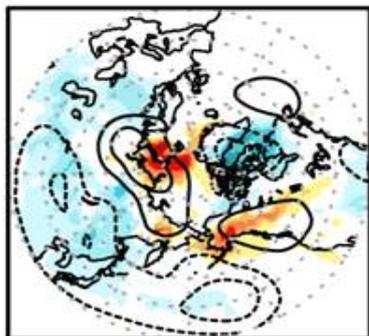
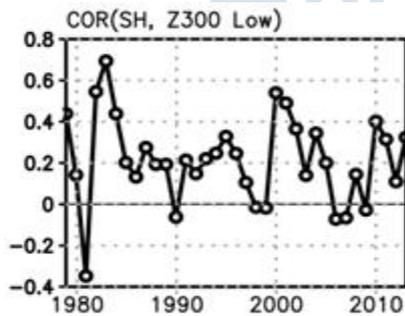


Fig. 3.2.5 (위) 시베리아 상층 저기압과 시베리아 고기압의 상관계수. (아래) 상층

와도 이류와 시베리아 고기압의 상관관계가 강화되는 해의 대기순환장 패턴. (왼쪽) 지상 기온 어노말리(채색), 300hPa 지위고도(등치선) (오른쪽) 100hPa 와도 (채색), 50hPa 지위고도 (등치선)

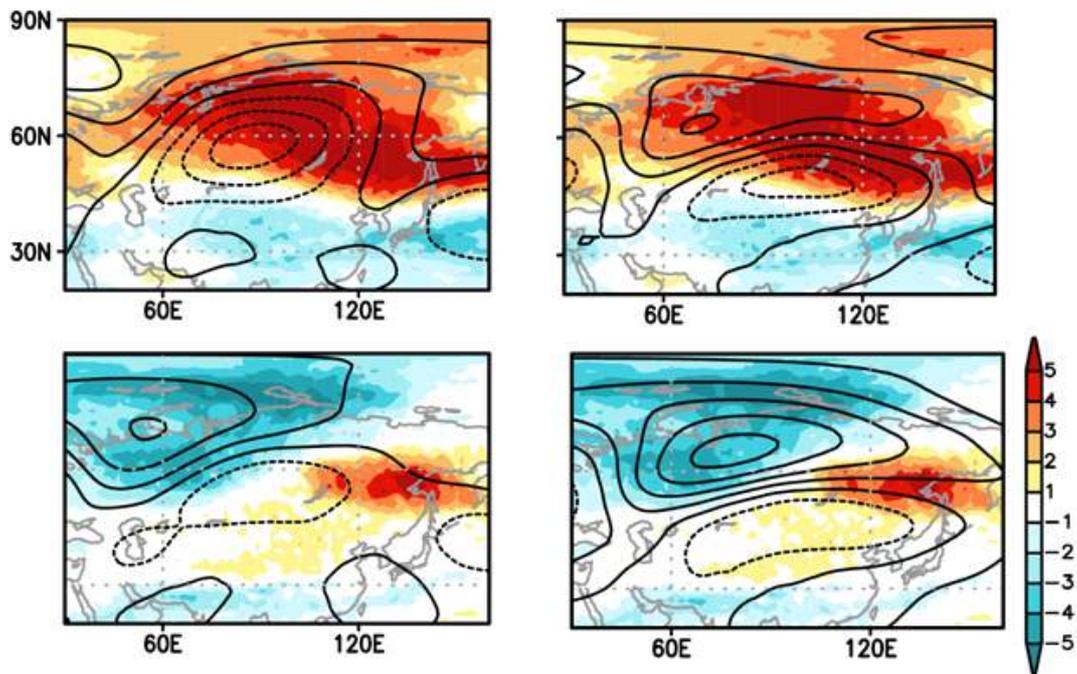


Fig. 3.2.6 (위) 음의 북극진동 해의 계절 평균 100hPa 와도장 (채색), 한파 발생일 전(왼쪽)과 후(오른쪽) 5일 동안의 300hPa 지위고도 어노말리(등치선) (아래) 양의 WACE 해의 경우.

3.3 역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석

3.3.1 역학 모형에서의 블로킹 모의 특성 파악

○ 기상청에서 제공하는 한·영 계절예측시스템 (GloSea 5)의 과거 재현된 기후장 (Hindcast)자료를 이용하여 블로킹이 어떻게 모의되는지 살펴보았다. 이 때, 기후장은 매달 1일, 9일, 17일, 25일을 시작일로 설정되었으며, 앙상블 멤버는 3개를 사용하였고, 기간은 1991년부터 2009년까지이다.

○ Fig 3.3.1과 같이, 동일한 기간(1991년~2009년)동안 재분석자료에 비해 GloSea5 Hindcast의 앙상블 평균된 자료에서 대서양 블로킹 빈도가 과소모의를 하고 있으며, 랩테프 해(90E-120E) 주변으로 뚜렷한 감소가 나타났다.

○ 각각의 앙상블 멤버에 대한 블로킹 빈도 climatology(Fig. 3.3.2)는 앙상블 모두를 평균한 결과(Fig. 3.3.1)에 비해서 좀 더 향상된 분포를 보였다. 특히 첫 번째 앙상블 멤버가 가장 재분석자료의 결과와 유사했으며, 이는 Signal to Noise 효과를 고려한 최적의 앙상블 멤버 구현에 대한 필요성을 제기한다.

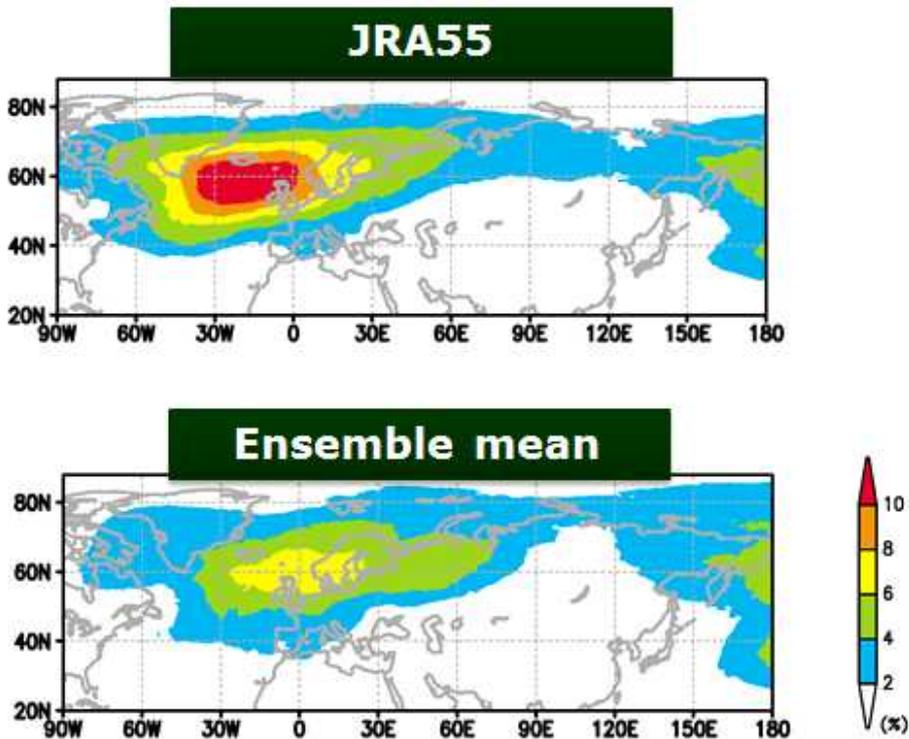


Fig. 3.3.1 (위) JRA55 재분석자료의 겨울철 블로킹 빈도 Climatology. (아래)

GloSea5 Hindcast의 앙상블 평균된 자료의 겨울철 블로킹 빈도 Climatology.

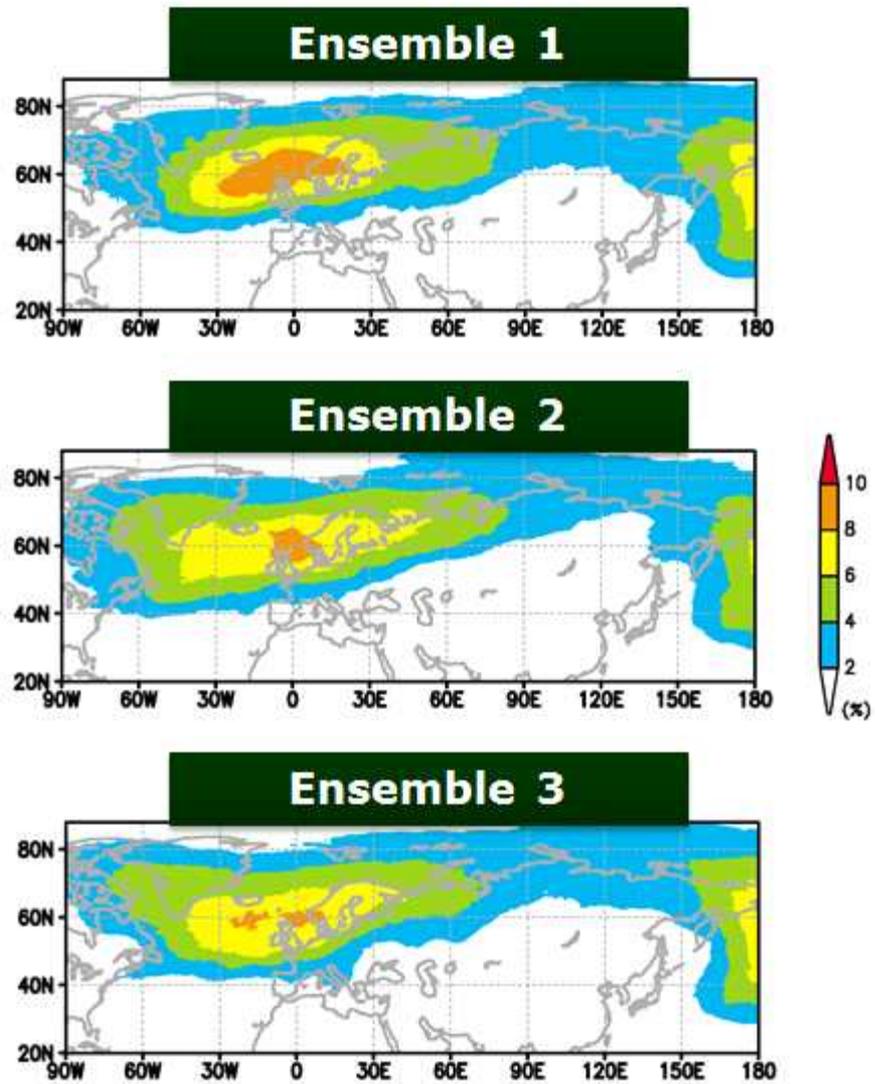


Fig. 3.3.2 GloSea5 Hindcast의 각 앙상블 멤버마다 겨울철 블로킹 빈도 Climatology.

3.3.2 블로킹과 관련된 한파 모의 성능 확인

○ 유라시안 대륙의 지상온도 변동성의 두 번째 모드인 WACE 패턴은 북극해 해빙에 의해 강제된 패턴이며, 우랄블로킹의 증가를 동반함으로써 동아시아 한파를 야기시킬 수 있는 가능성에 대해 선행연구에서 많이 언급되었다 (Kim et al., 2014; Mori et al., 2014; Kug et al., 2015)

○ 북극 해빙 감소가 WACE 패턴과 관련된 우랄블로킹 발생을 변화시키는지에 대한 여부를 CAM3(Community Atmospheric Model Version 3.0; Collins et al., 2004) 모델 실험을 통해 확인하고자 Table 3.3.1과 같은 실험을 구상하였다.

Table 3.3.1 CAM3 모델 실험 구성

모델명	실험명	실험내용
- CAM3	기준 실험	해빙농도, 해수면 온도의 장기간(1981-2010) 계절변동의 기후값을 넣은 실험
- 79, 159개 양상블 멤버	해빙 농도 실험	초겨울 북극 해빙농도가 평년보다 낮은 해들에 대해서만 해빙농도, 해수면 온도의 계절변동의 합성도를 넣은 실험

○ 북극 해빙 감소에 의한 대기 반응은 카라-바렌츠를 중심으로 warm air와 시베리아 지역을 중심으로 cold anomaly 분포를 보이며, 이는 WACE 패턴과 아주 유사했다. 또한 해수면기압 아노말리도 우랄 지역을 중심으로 양의 아노말리가 넓게 자리잡고 있다 (Fig. 3.3.3).

○ 해빙 감소로 인해 북극 온난화 발생 뿐만 아니라 상층 고기압 아노말리 형성과 동아시아 기압골 발달은 우랄 블로킹 발생환경에 최적의 조건임을 확인했다 (Fig 3.3.3).

○ 따라서 WACE 패턴은 고유의 internal mode이며, 최근 급격한 해빙감소로 인한 대기 반응 패턴이 기존 WACE 패턴의 발생빈도를 증가시켰다. 이 때 바렌츠해 중심으로 surface warm air와 주변에 quasi-barotropic 구조하에 상층 고기압 아노말리 형성은 곧 우랄 블로킹 발생확률을 증가시켰으며, 그에 따른 시베리아

지역에 상층저기압을 강화시킴으로써 한랭이류로 인한 동아시아 한파를 불러움을 확인하였다.

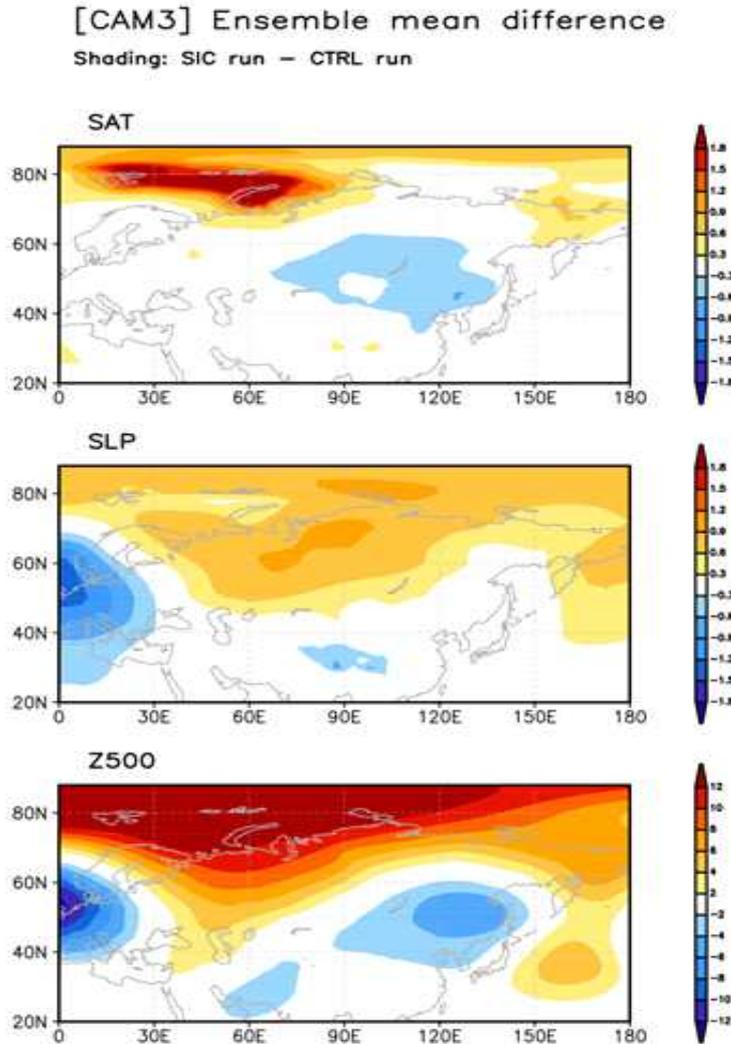


Fig. 3.3.3 각 변수 (위; 지상온도 아노말리, 중간; 해수면기압 아노말리, 아래; 중층 지위고도 아노말리) 에 대한 두 가지 실험의 앙상블 평균 차이

3.3.3 중위도 블로킹 예측을 위한 최적 초기조건 앙상블 생성 연구

○ 사용된 앙상블 멤버 수(39, 79, 159)에 따라 해빙감소에 따른 WACE index의 확률밀도함수(Probability Density Function) 분포가 달라졌으며, 앙상블 최대 개

수(159)일 때 가장 이상적인 결과를 얻었다 (Fig. 3.3.4, Fig. 3.3.5). 모델 실험에서 WACE index는 평균보다는 변동성 측면에서 변화가 다소 컸으며, 해빙이 감소했을 때 양(음)의 WACE 패턴 빈도가 더욱 증가(감소)함을 확인하였다.

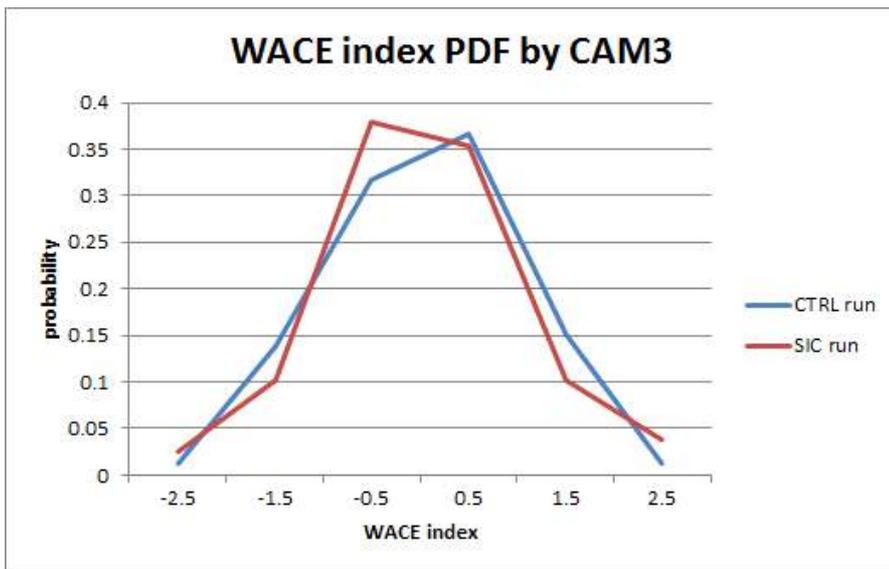


Fig. 3.3.4 두 가지 CAM3 모델 실험을 이용해 WACE index에 대한 확률밀도함수 분포. 이 때, 각 실험의 PC2 시계열에 대한 PDF를 분석했으며, 79개 앙상블을 이용함.

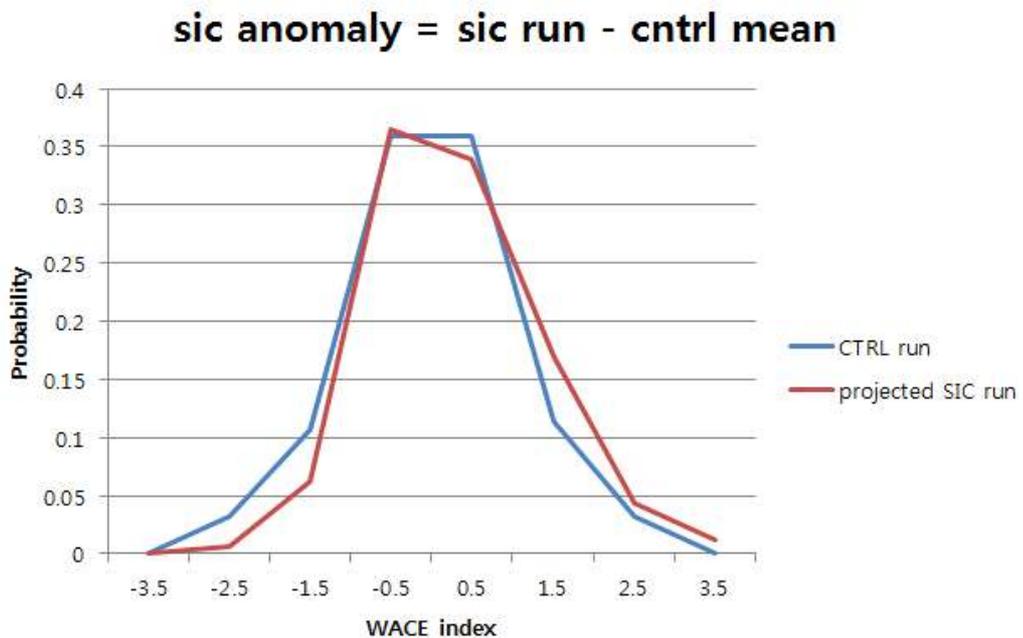


Fig. 3.3.5 두 가지 CAM3 실험을 이용해 WACE index에 대한 확률밀도함수분포. 이 때 해빙농도 실험은 기준 실험의 WACE EOF에 프로젝션된 지상기온 아노말리를 이용한 결과이며, 159개 앙상블을 이용함.

3.4 극과도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해2

3.4.1 대류권계면 접힘과 시베리아 고기압 발달 관련성 분석

○ 20th-Century Reanalysis 장기 재분석 자료를 이용해 각 특정 시기별 WACE와 블로킹 빈도의 관계를 살펴본 결과, P1 (1930-1954), P3 (1980-2013) 시기에 WACE 패턴과 관련된 블로킹 빈도가 바렌츠/카라 해 부근에서 증가하는 반면, P0 (1901), P2(1955-1979) 시기에는 WACE 패턴과 관련된 블로킹 변동이 뚜렷하지 않은 특징이 나타남을 확인하였다 (Fig. 3.4.1).

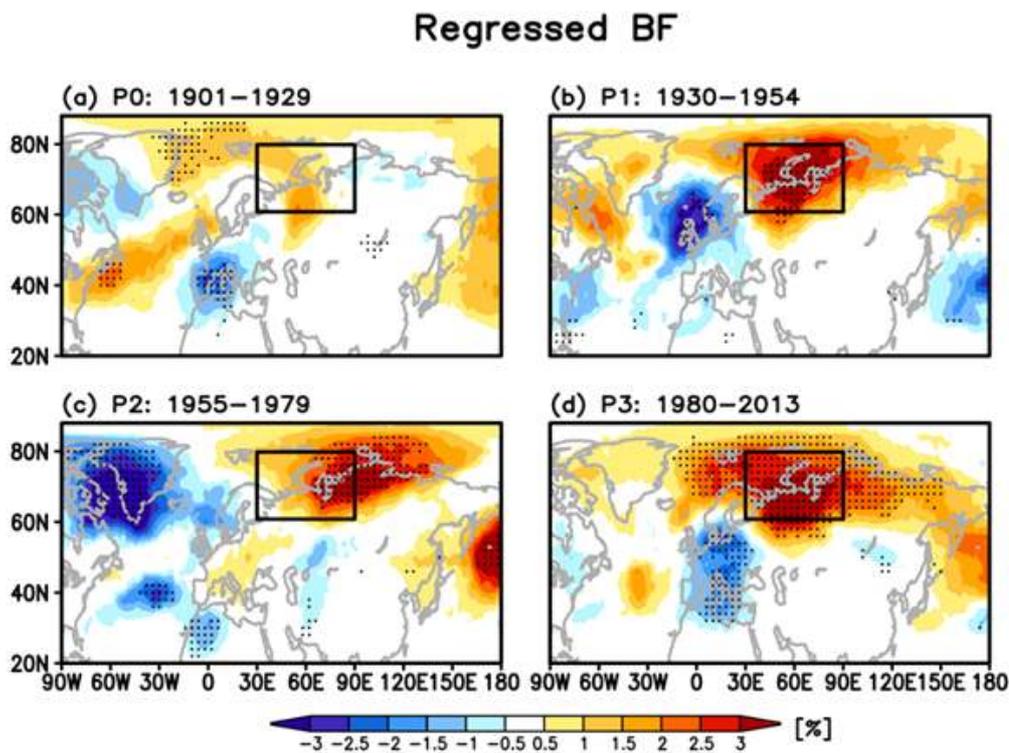


Fig. 3.4.1 각 시기별 WACE 패턴 지수에 회귀분석된 블로킹 발생 빈도

○ 이러한 수십 년 주기의 우랄 블로킹의 변동은 북대서양 지역 300hPa 남북풍 (V300)의 두 번째 EOF (EV2)로 대표되는 순환장 패턴의 장주기 변동과 매우 높은 관련이 있다 (Fig. 3.4.2).

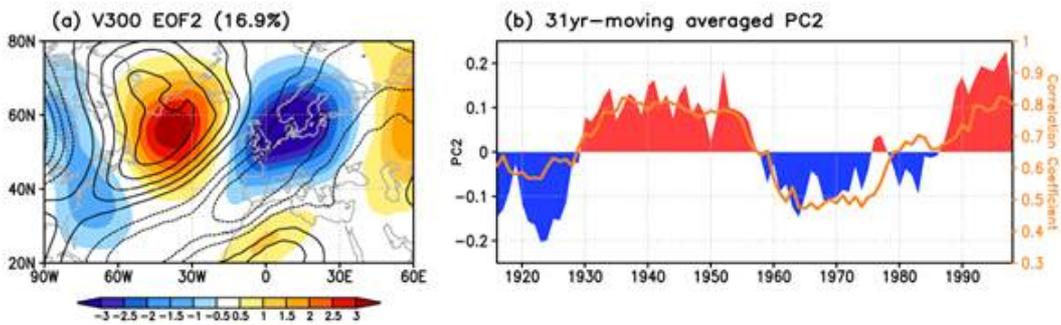


Fig. 3.4.2 북대서양 지역 (90W-60E,20N-80N)에서의 대류권 상층 남북풍의 EOF 두 번째 모드 (좌, 채색) 및 관련 시계열 (우, 채색)

○ 북대서양 지역 남북풍의 EV2 모드(Fig. 3.4.2)는 평균 대기경압성 및 스톱트랙 분포의 변동을 나타내며, 이에 따른 transient eddy vorticity flux의 차이는 이 지역에서 발달하는 파동열의 평균적인 위상 빈도에 영향을 미친다. 즉, P1, P3 시기의 북대서양 지역 대기 평균장으로부터 발달하는 로스비파는 종종 바렌츠/카라해 지역 블로킹의 발생 빈도를 증가시키는 위상으로 발달하는 반면, P0, P2 시기의 평균장으로부터 발달하는 로스비파는 바렌츠/카라해 블로킹의 발달을 감소시키는 위상으로 발달하는 경우가 빈번하다 (Fig. 3.4.3) 또한 북대서양에서의 SST로 야기된 스톱트랙의 변화로 인해 로스비파의 발달은 바렌츠/카라해 지역에 유의한 고기압성 순환을 형성시킨다는 선행연구의 결과가 본 연구의 주장에 잘 뒷받침해주고 있다(Jung et al, 2017; Kim et al., 2017).

○ 이러한 블로킹 빈도수의 차이는 P0-P3 각 시기별 시베리아 고기압과의 상호작용 강도에 영향을 미치는데, 블로킹-시베리아 고기압 상호작용이 강한 P1, P3 시기에는 전형적인 warm Arctic and cold Eurasia 패턴 구조가 나타남에 반해, 블로킹-시베리아 고기압 상호작용이 약한 P0, P2 시기에는 WACE 패턴의 구조

가 전형적인 구조로 발달하지 못하는 특징을 갖게 된다 (Fig. 3.4.4).

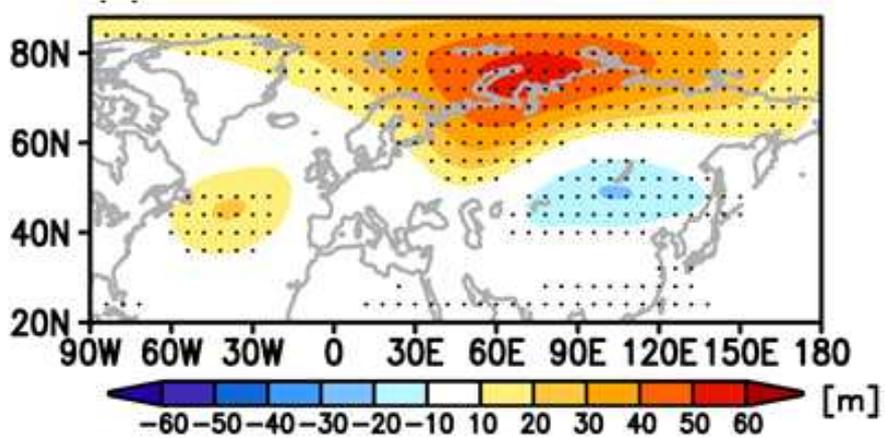


Fig. 3.4.3 P1, P3 시기에 빈번하게 발달했던 로스비파의 구조. P0, P2 시기에는 반대 위상의 로스비파가 빈번하게 발달함. 채색은 WACE와 관련된 상층 지위고도(300hPa geopotential height)를 나타냄.

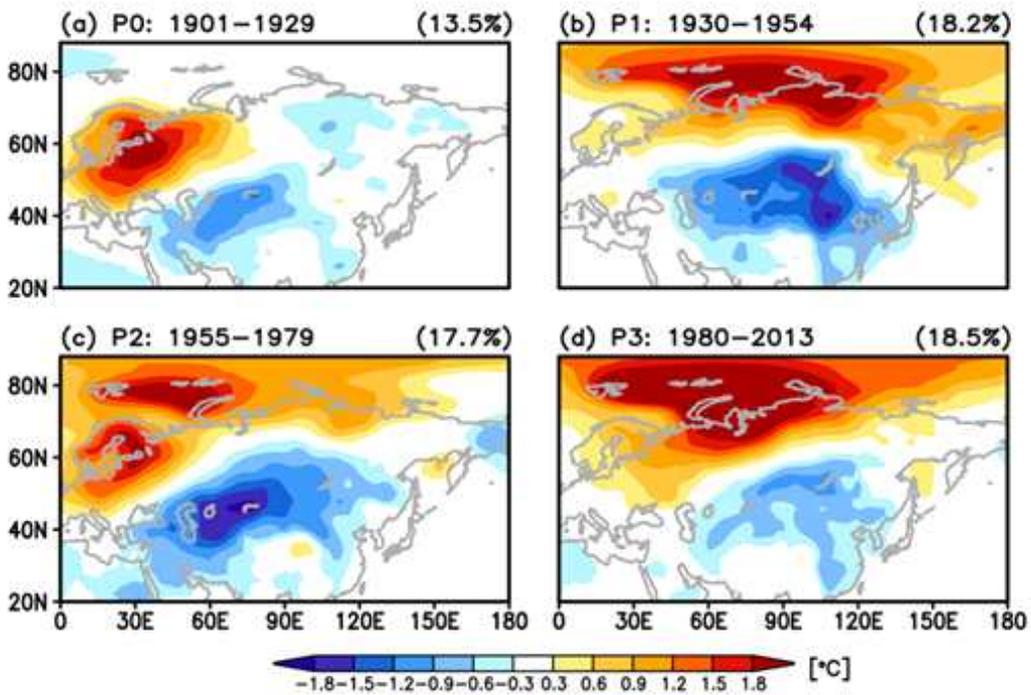


Fig. 3.4.4 각 시기(P0, P1, P2, P3)별로 정의된 WACE EOF 공간장 패턴들.

○ P0, P2 시기에는 warm Arctic and cold Eurasia 온도 패턴의 구조가 왜곡되는 양상이 나타나는데, 지상 기온 아노말리의 중심이 보다 서쪽으로 치우쳐져 있다. 특히 P0시기에는 동시베리아와 러시아지역에 아노말리 시그널이 많이 사라져있으며, total variance 비율이 13.5%로 다른 시기에 비해 매우 낮은 양상을 보인다 (Fig. 3.4.4).

○ 현 3.4.1절에서 분석된 WACE 변동성의 특징은 Sung et al. (2018)로 공식적인 논문으로 출판되었다.

3.4.2 극화도 역전 기법을 적용한 대기 상-하층 간 상호작용 과정 분석

○ 선행연구에서 시베리아 고기압의 발달을 유도하는 상류지역 순환장 구조로서 음의 북대서양 진동(-NAO)이 알려져 있으며 (Sung et al., 2011), Fig. 3.4.3에 나타난 구조와 같은 로스비 파열 (BO-like)이 시베리아 고기압의 발달을 유발하는 원인으로 작용하게 되는데, 본 연구에서는 두 순환장 구조(BO, NAO)에 따라 시베리아 고기압의 발달 지속 기간에 차이가 있음을 밝혔다 (Fig. 3.4.5).

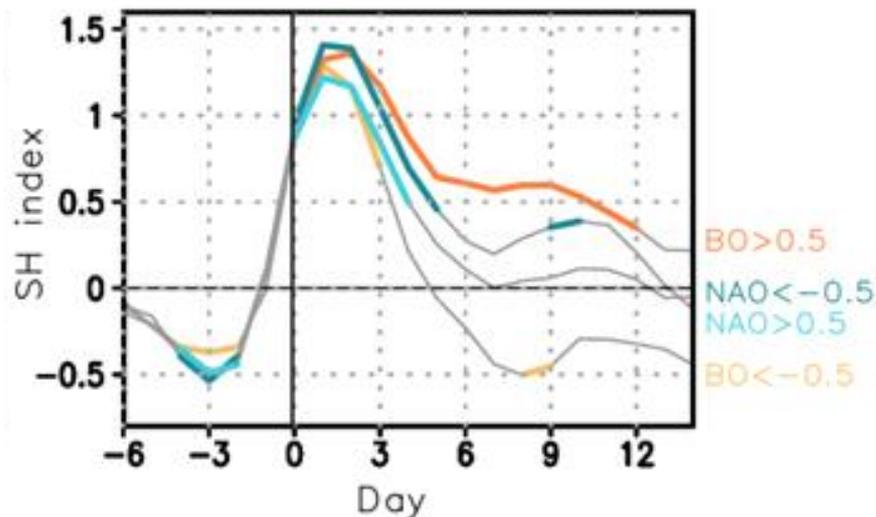


Fig. 3.4.5 유라시아 상류 지역의 순환장 패턴에 따른 시베리아 고기압의 발달 지속 기간. BO-like으로 표시된 로스비 파열 패턴이 시베리아 고기압의 발달을 지

속하는 데에 기여하는 것으로 판단됨.

○ BO-like 로스비 파열과 시베리아 고기압의 발달 지속성의 상관 관계는 성층권 극와도 순환과 관련이 있는 것으로 추정된다. 시베리아 고기압의 발달과 관련된 대기 순환장 패턴이 BO-like 구조일 때 Fig. 3.4.6과 같이 성층권 극와도 순환이 강해지는 특징이 나타난다. 이러한 상층 순환장 조건은 시베리아 고기압 발달 시에 BO-like 로스비 파열을 통한 에너지 전파를 지속시키는 역할 뿐만 아니라, 강한 성층권 와도의 대류권 관입을 통해 시베리아 지역 상층의 저기압계의 발달 강도를 강화시킴으로써 시베리아 고기압의 발달 지속에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

○ BO-like 구조일 때 하부 성층권 온도가 낮으므로 강한 극와도 조건일 것으로 추정할 수 있다.

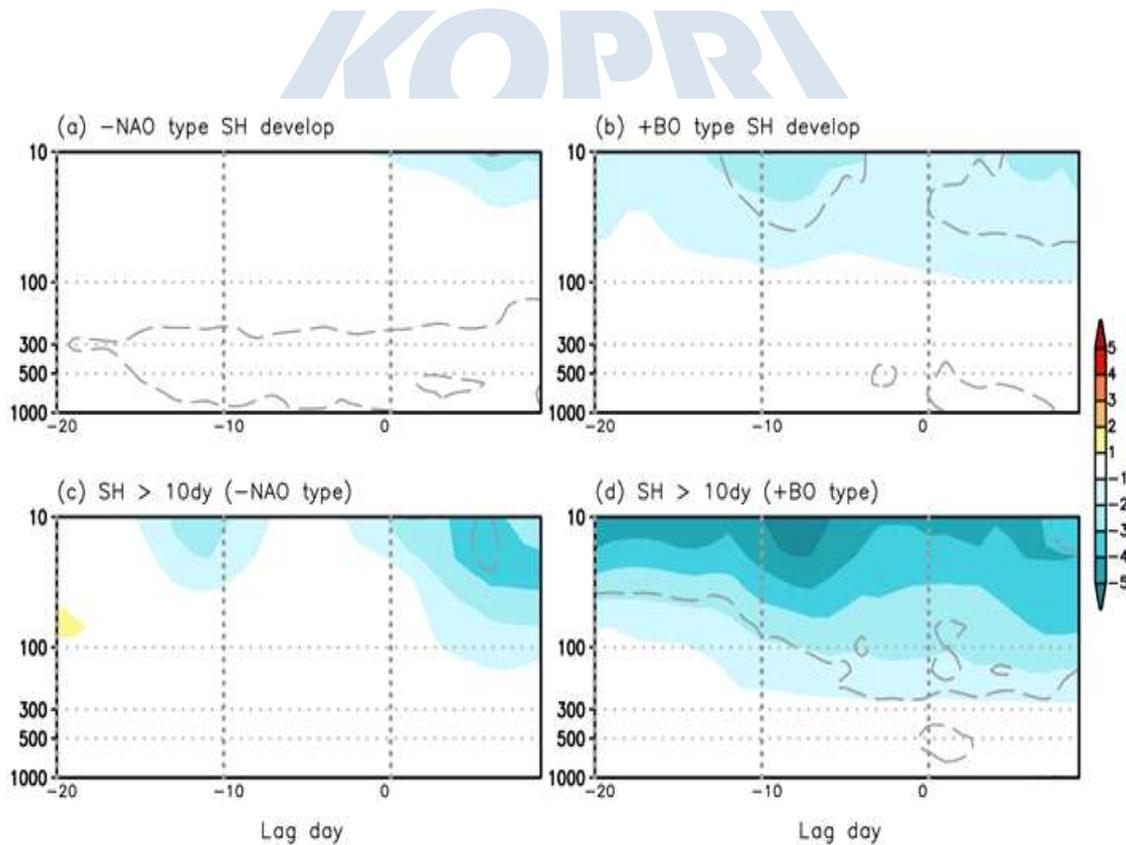


Fig. 3.4.6 시베리아 고기압의 발달을 유발하는 대기 순환 패턴의 종류에 따른 극 지역 (65-90N) 평균 연직 기온 구조.

3.4.3 2015/16, 2016/17 겨울 블로킹 및 한파 특성 비교 평가

○ 2015/16년, 2016/17년에 대한 겨울철 북반구 블로킹 빈도 분포를 Fig. 3.4.7에 나타내었다. 먼저, 2015/16년 한겨울(12~2월) 블로킹 빈도는 우랄 지역에서 가장 높은 값 15.3%를 기록했으며, 이는 북반구 블로킹 climatology 분포(Fig. 3.5.3)와 상당히 다른 것으로, 상당히 특이한 경우의 해였던 것으로 볼 수 있다. 두 번째로 높은 빈도를 보인 지역은 유럽이었으며, 그 외에 그린란드 서쪽, 북대서양에서 블로킹이 발생하였다.

○ 2016/17년도 한겨울 최대 블로킹 빈도는 북반구 전체에서 북동태평양지역이 30%로 매우 높게 발생하였고, 이곳은 일반적으로 저주기 에디(Low-frequency eddies) 변동성이 강한 지역으로, 이와 관련된 블로킹 발달이 활발히 일어나는 것으로 흔히 알려져 있다.

○ 2015/16년, 2016/17년에 대한 한파 특성을 알아보기 위해, Fig. 3.4.8과 같이 각 해당연도에 따른 겨울철 지상기온 아노말리를 나타내었다. 먼저, 2015/16년도 한겨울 지상기온 분포는 척치 해와 카라/바렌츠 해를 포함하여 5°C 이상의 높은 고온 현상을 보였고, 북미지역과 카자흐스탄/이란 지역, 동시베리아 지역에서 강한 한랭 아노말리 시그널이 나타났는데, 이는 전형적인 북극 온난화로 인한 Warm Arctic-Cold Continents 패턴이다.

○ 선행연구로부터 Warm Arctic-Cold Continents 패턴과 우랄블로킹과의 밀접한 관련성은 많이 알려져 있는데(Kim et al., 2014; Mori et al., 2014; Kug et al., 2015), Fig. 3.4.7에서 나타난 우랄 블로킹 발생 위치와 Fig. 3.4.8에 나타난 북극 고온-중위도 저온 발생 위치가 맥락상 잘 일치한다. 그러나 우랄 블로킹 발생시 보통 시베리아지역을 포함한 동아시아 지역에 한파가 오는 것으로 알려져 있는데, 2015/16년 케이스는 이에 해당하지 않았다. 다시 말해, 지상기온 아노말리의 계절 평균장(seasonal mean state)에 우랄 블로킹의 영향은 다소 크지 않은 것으로 추정된다.

○ 2016/17년도 지상 기온의 지리적 분포도는 동시베리아 지역과 캄차카, 척치해, 북미 서해안을 따라 5°C 이상의 높은 고온을 보였다(Fig. 3.4.8). 반면 북동아메리카 지역에 강한 한랭 아노말리가 나타났으며, 이는 북미 한파와 연관될 것으로 추

정된다. 따라서 2016/17년도 지상기온 분포는 전반적으로 북미 동쪽 지역을 제외한 북반구 대륙전체에서 온난화 시그널이 나타났으며, 이러한 패턴은 특이해로 간주되며, 블로킹 영향으로 인한 한파 발생은 매우 미미한 것으로 사료된다.

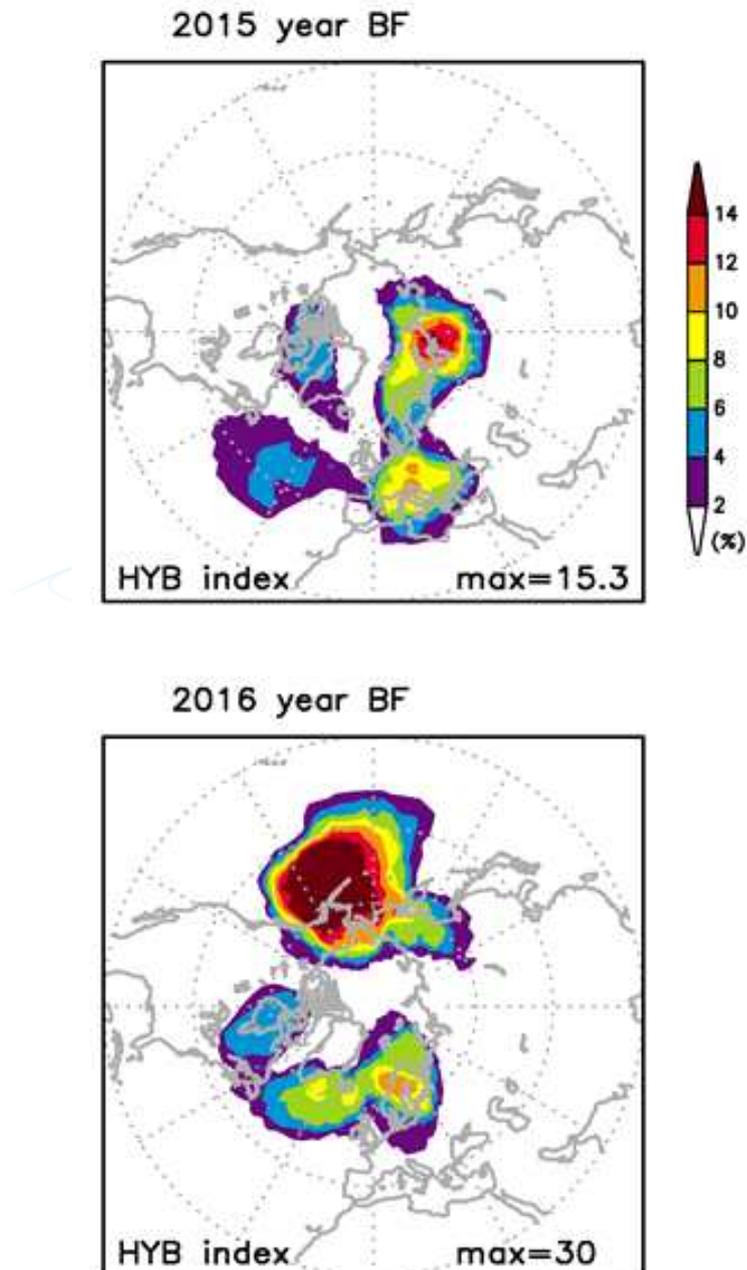


Fig. 3.4.7 2015/16년(위), 2016/17년(아래) 북반구 겨울철(12월~2월) 블로킹 빈도. 이 때, 블로킹 빈도 간격은 2%임. 북반구 최대 블로킹 빈도 값은 그림 오른쪽 하

단에 표시되어있음.

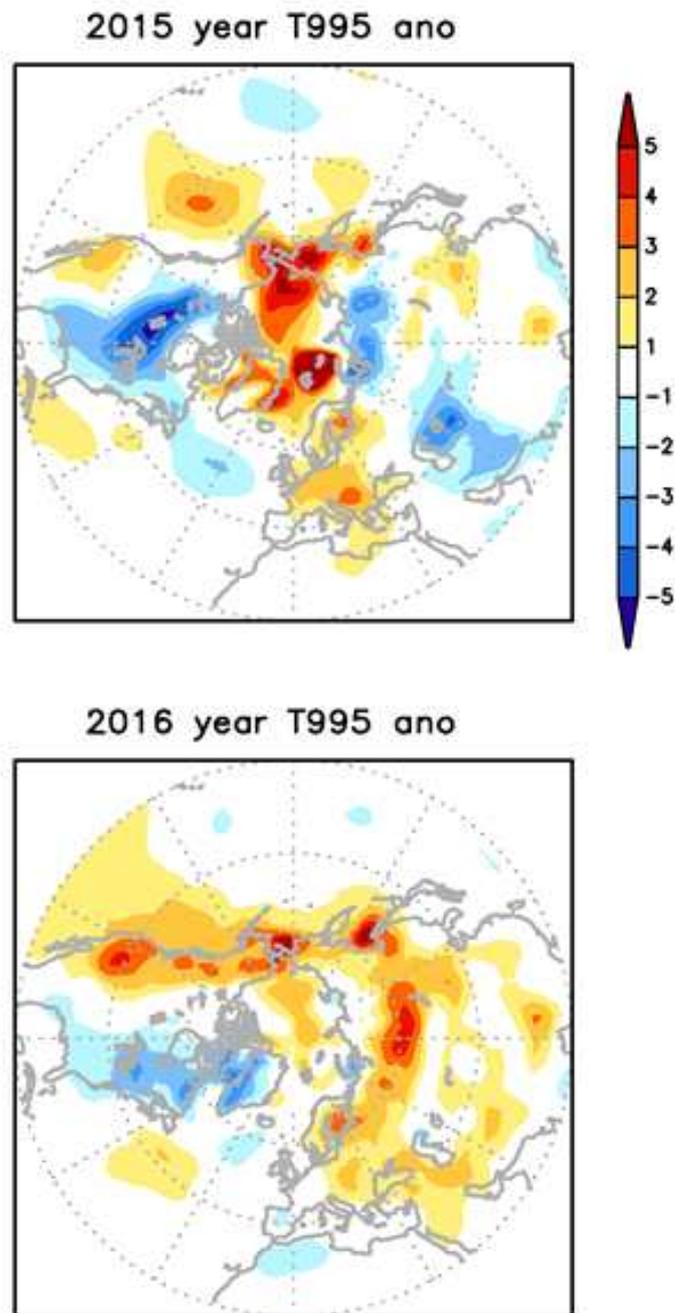


Fig. 3.4.8 2015/16년(위), 2016/17년(아래) 북반구 겨울철(12월~2월 평균) 지상기온 (sigma 955레벨에서의 지상온도) 아노말리. 이 때, 지상기온 아노말리 간격은 1°C 임.

3.5 지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석

3.5.1 외부 강제력 변동에 따른 블로킹 발생 특성 분석

○ 최근 선행연구에 따르면, 전지구기후모델(CESM-CAM5; Neale et al., 2012)가 겨울철 북극 기후와 원격상관 패턴을 모의하는데 있어서 서로 다른 역학적 모델 코어가 상당히 큰 영향을 줄 수 있으며, 특히 분광요소법이 유한체적법보다 북극 해빙 감소에 따른 북미 한파 반응이 잘 모의되었다고 보고하였기 때문에(Jun et al. 2018), 본 연구에서도 블로킹을 모의하는데 있어 서로 다른 역학코어에 따른 차이가 있는지 살펴보았다.

○ 2000년대 현재기후에서 최신 전지구기후모델(CESM-CAM5)의 서로 다른 역학코어(유한체적법, 분광요소법)로 외부 강제력을 적용했을 때, 분광요소법(Semi-Element core)에서 블로킹 빈도 바이어스가 더 크게 나타났다 (Fig. 3.5.1).

○ 특히 두 실험(유한체적법, 분광요소법) 모두 블로킹 발생일이 태평양은 과대모의로 나타났으며, 대서양은 과소모의하였는데 (Fig. 3.5.1), 이는 기존 선행연구 결과와 유사하였으며, 여전히 모델에서의 블로킹 모의 능력 개선에 대한 필요성을 제기되는 부분이다.

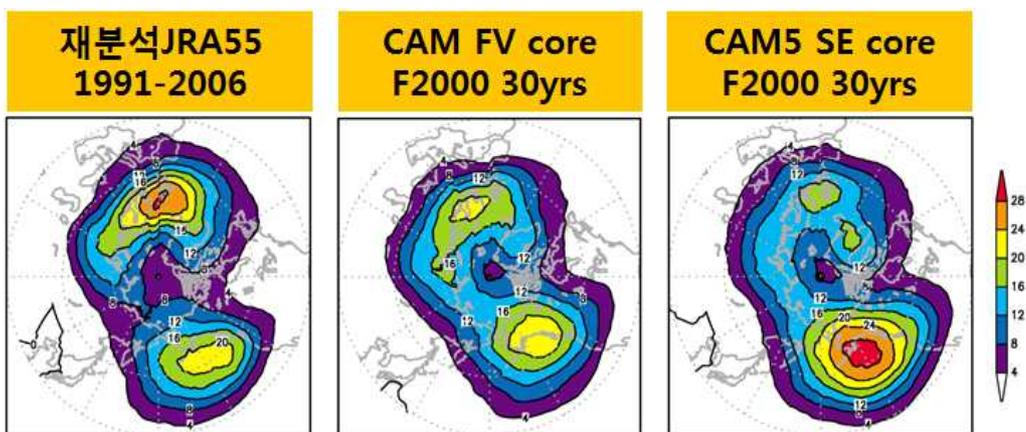


Fig. 3.5.1 모델 역학코어 강제력 변동에 따른 연평균 블로킹 빈도. (왼쪽) 1991-2006 기간의 재분석자료 (중간) CAM5 유한체적법의 F2000 실험 (오른쪽) CAM5의 분광요소법의 F2000 실험

○ Park (2014)은 모델의 Unified Convection scheme(UICON)을 적용하였을 때, 대류와 관련된 MJO, 극지역 구름 모의 등과 관련해 크게 개선됨을 보여주었고, Kim et al. (2016)은 북극 기후 피드백을 모의하는데 있어 하층운 모수화의 영향이 매우 중요하다고 주장하였기 때문에, 본 연구에서는 UNICON 스킴을 적용했을 때, 모델에서의 블로킹 발생 민감도 차이 실험을 하였다 (Fig. 3.5.2).

○ 물리모수화를 다르게 적용했을 때, 대서양보다 태평양에서 뚜렷한 과대모의를 확인하였고, 이는 대류와 관련된 태평양 평균장 바이어스가 증가한 것으로 추정된다.

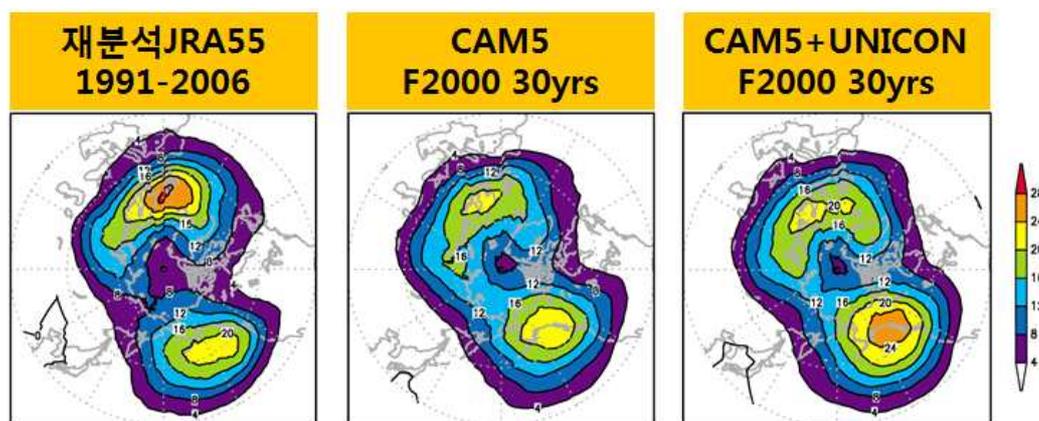


Fig. 3.5.2 모델 물리모수화 강제력 변동에 따른 연평균 블로킹 빈도.(왼쪽) 1991-2006 기간의 재분석자료 (중간) CAM5 유한체적법의 F2000 실험 (오른쪽) UNICON 스킴이 결합된 CAM5 유한체적법의 F2000 실험

3.5.2 블로킹 역학 모의 시스템 평가 및 개선

○ 블로킹 현 모의 시스템은 이전 분석(3.5.1절)에서 살펴보았다시피, 여전히 재분석 자료의 결과와는 많이 동떨어져있는 실정이며, 이에 대한 개선 방법에 대해 모델 평균장 바이어스 제거, 물리모수화의 불확실성 감소, 모델 해상도 향상 등 다양하게 제시되고는 있으나, 보다 근본적인 접근에 대한 필요성을 느꼈다. 현재 블로킹 자체 탐지 방법들에 대해 조사한 결과, 실제로 블로킹 정의 방법에 대한 수많은 논쟁이 이루어지고 있는 실정이며, 현재까지 합의된 정의 및 탐지 방법은 없다(Barriopedro et al. 2010; Dunn-Sigouin et al. 2013; Kim and Ha 2015).

○ Barriopedro et al. 2010에 따르면, 탐지 조건에 따라 블로킹 결과가 매우 다양할 수 있음을 보였으나, 공통의 탐지조건을 적용하여 다양한 블로킹 탐지방법에 대해 상세히 비교한 연구가 현재까지 없었기 때문에, 본 연구에서는 이에 대한 연구를 실시하였다.

○ NCEP-NCAR 재분석자료(Kalnay et al. 1996)를 이용하여 겨울철 1950년~1989년 기간 동안 총 4가지 방법(아노말리 방법, 로컬 역전 방법, 대규모 역전 방법, 하이브리드 방법)으로 동일한 탐지 알고리즘을 적용하여 블로킹 Climatology를 생산했다.

○ 4가지 블로킹 탐지 방법으로, 북반구 블로킹 특성들을 Table. 3.5.1에 나타내었다. 가장 많은 이벤트 수를 탐지한 것은 367개의 아노말리 방법이었으며, 185개의 로컬 역전 방법이 가장 적은 이벤트 수를 기록했다. 평균 duration 측면에서는 대부분 비슷했으나, 그 중 8.84일로 대규모 역전 방법이 가장 높게 나타났다.

Table. 3.5.1 Northern Hemisphere blocking characteristics determined by four detection methods

DJF	HYB index	ANO index	LOC index	LAR index
Number of blocking events	279	367	185	206
Number of blocking days	2267	3158	1341	1821
Mean blocking duration	8.13	8.60	7.25	8.84

○ Fig. 3.5.3과 같이, 블로킹 빈도의 공간장 분포에 대해 살펴보면, 아노말리 근거 방법(하이브리드; Dunn-Sigouin et al. 2013, 아노말리 방법; Dole and Gordon

1983; Sausen et al. 1995)은 날짜경계선을 기준으로 서쪽에 치우쳐져 있고, 역전 근거 방법(로컬 역전; Tibaldi and Molteni 1990; Davini et al. 2012, 대규모 역전 방법; Pelly and Hoskins 2003; Masato et al. 2013)은 반대로 동쪽에 치우쳐져 있다. 즉, 처음에 어떤 필드(아노말리 혹은 역전)를 선택하는 지에 따라 블로킹 발생 선호 지역이 다르게 결정될 수 있음을 보여주는 대목이다.

○ 여기서 역전방법은 2가지로, 각각 로컬과 대규모 역전방법이 있는데, 이들은 계산방법도 다르게 실시되긴 하지만, 블로킹 탐지되는 기준 위도도 서로 다르다. 로컬 역전 방법의 경우, 블로킹 고기압 위도를 모든 경도에 대해 모두 동일하게 북위 50도로 설정해놓지만, 대규모 역전 방법의 경우는 태평양은 북위 45도 부근으로, 대서양은 북위 58도 부근으로 될 수 있게 하는, 스톱트랙 활동 위도대로 설정하기 때문이다. 그래서 대서양 부근에서 최고 빈도 위치를 나타내는 지역이 서로 다르다. 로컬 역전 방법은 유럽부근을 중심으로, 대규모 역전 방법은 그린란드 남서쪽으로 maximum frequency core가 나타난다.

○ 이렇게 서로 다른 정의로 탐지한 블로킹 방법들 중에서 가장 북반구에서 큰 차이를 나타낸 지역은 캄차카반도를 중심으로 한, 북서태평양 지역이다. 아노말리 근거 방법들(하이브리드, 아노말리 방법)에서는 북서태평양 지역에서 블로킹 빈도가 매우 낮은 반면, 역전 근거 방법들에서는 최고 빈도가 14%이상을 보여준다. 즉, 어떤 탐지 방법을 선택하느냐에 따라, 북서태평양에서 탐지되는 블로킹 빈도가 매우 달라질 수 있음을 보여주며, 앞으로 특정 지역에 대해 블로킹을 분석할 때는 해당 지역 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 탐지 방법으로 연구해야 할 중요성을 보여준다.

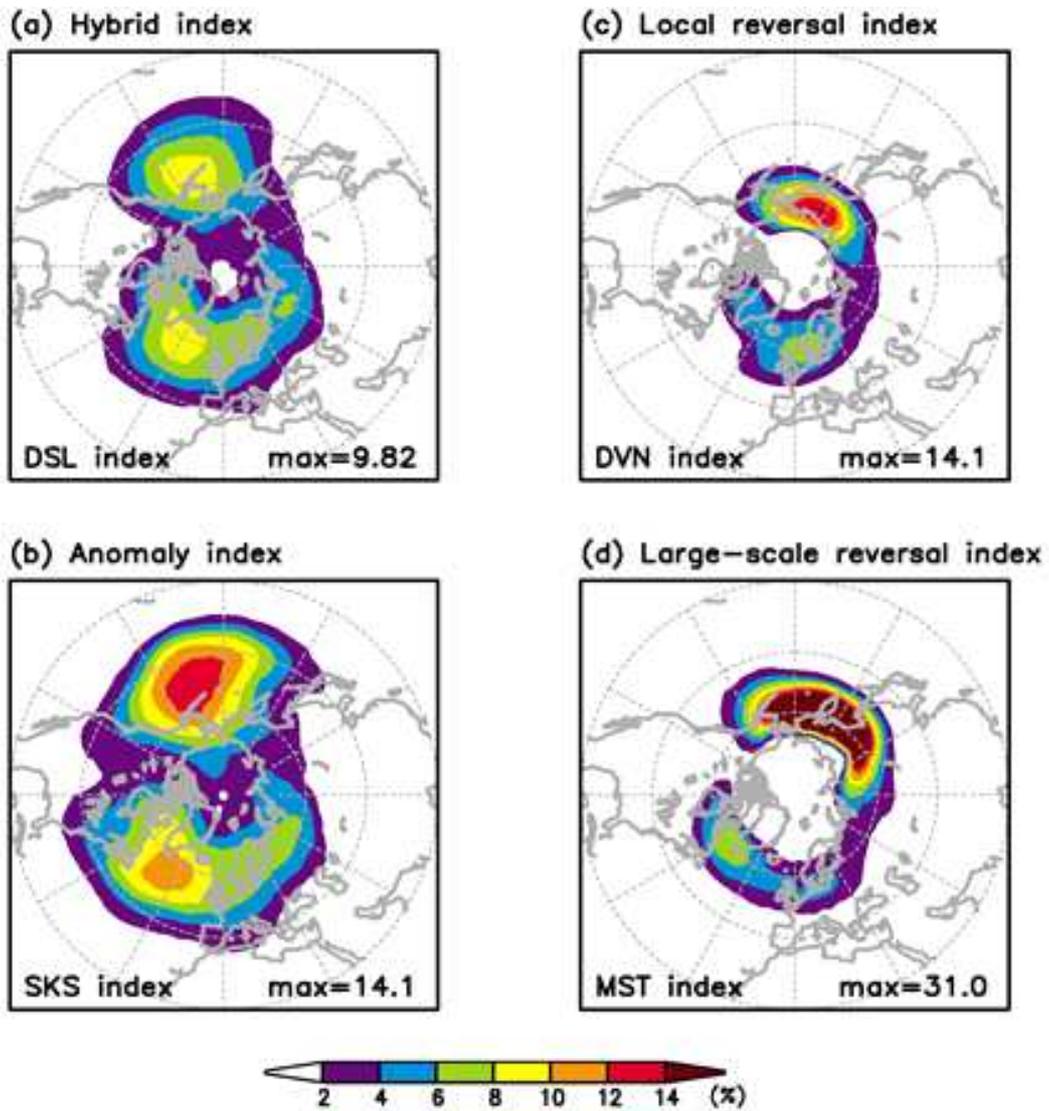


Fig. 3.5.3 블로킹 탐지 방법에 따른 겨울철 블로킹 빈도. (위-왼쪽) 하이브리드 방법 (아래-왼쪽) 아노말리 방법 (위-오른쪽) 로컬 역전 방법 (아래-오른쪽) 대규모 역전 방법

3.5.3 한파 관련 최저기온 극기후값 분포에 대한 역학모형 모의 특성 분석 및 예측성 연구

○ 앞서 제시한 다양한 블로킹 탐지 방법을 이용하여, 동아시아를 포함한 북서태평양 지역을 중심으로 블로킹 특성들을 살펴보았다(Table. 3.5.2). 가장 많은 이벤트 수를 기록한 것은 123개의 대규모 역전 방법으로, 가장 적은 이벤트 수는 64개의 하이브리드 방법으로, 이는 북반구 전체에서 보았던 블로킹 이벤트 특성과 대조되는 부분이다(Table. 3.5.1). 특히 대규모 역전 방법은 북서태평양 블로킹을 가장 많이 탐지하기도 했으나, 평균적으로 10.8일이라는 가장 긴 지속성을 보였는데 이는 매우 흥미로운 부분으로, 기존 다른 3가지 방법은 7~8일이라는 점과 아주 많이 대비되기 때문이다.

Table. 3.5.2 Western North Pacific blocking characteristics determined by four detection methods

DJF	HYB index	ANO index	LOC index	LAR index
Number of blocking events	64	90	88	123
Number of blocking days	477	747	690	1326
Mean blocking duration	7.5	8.3	7.8	10.8

○ 북서태평양 블로킹이 발생했을 때의 대기 순환장에 관한 합성도를 Fig. 3.5.4에 나타내었다. 검은색 두꺼운 등치선은 climatological 5220m로, Continental trough와 Alaskan Ridge가 기후적으로 잘 자리잡혀 있는 것을 보여주는데, 만약 북서태평양 지역에서 블로킹이 발생했을 때, 이러한 중층 기압능은 북서쪽방향의 극지역 방향으로 치우쳐지면서, 그와 동시에 중층 기압골은 얕아지면서 깊어지는 양상을 동반

하게 된다. 즉, 이러한 패턴은 저기압성 순환의 파동(cyclonic waviness)을 형성한다.

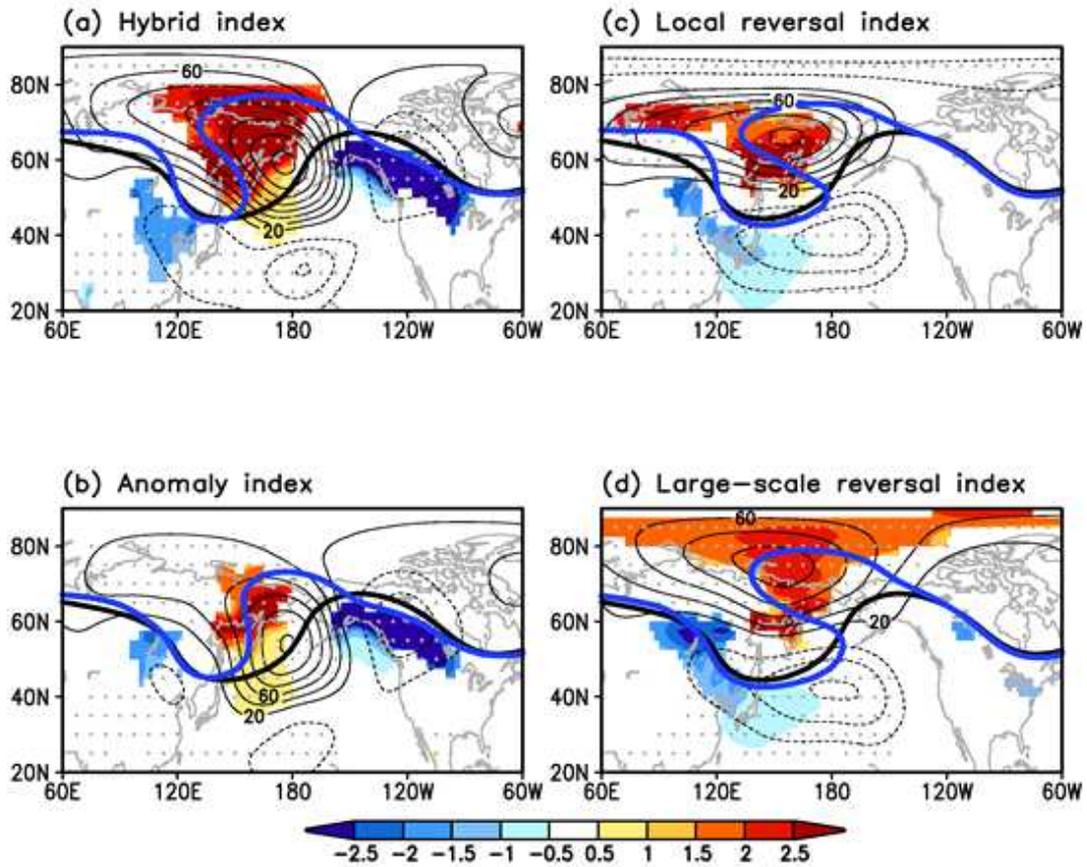


Fig. 3.5.4 블로킹 탐지 방법에 따른 북서태평양 (120E-180) 지역의 대기 순환 합성도. 지상기온 아노말리 (채색) 5220m (두꺼운 등치선) 중층 지위고도 아노말리 (얇은 등치선)

○ 이러한 중층 지위고도의 절대 필드(absolute field)의 변화는 아노말리 필드의 변형을 불러오는데, 이는 Fig. 3.5.4의 얇은 등치선으로 확인할 수 있다. 4가지 방법 모두 감차카 반도를 중심으로 고기압 아노말리와 저위도 저기압 아노말리를 보여주고 있는데, 이는 전형적인 블로킹 패턴인 High-over-Low structure이다. 이 중 아노말리 근거 방법들(하이브리드, 아노말리 방법)은 북미지역에 저기압 아노말리가 나타나고 있는데, 이는 적도에서부터 시작된 wave-like pattern과 비슷하며, teleconnection-like pattern과 관련이 있는 특성을 보여준다. 동태평양에서 가장 블로킹 빈도가 많이 탐지되는 아노말리 근거 방법들은 흔히 El Nino-Southern

Oscillation (ENSO)와 Pacific-North American (PNA) 패턴과 관련성이 높다고 알려져 있다(Kushnir 1987; Renwick and Wallace 1996).

○ 또한 4가지 방법 모두 북서태평양 블로킹이 발생했을 때, 캄차카반도를 중심으로 양의 지상기온 아노말리가 유의하게 나타나고 있다 (Fig. 3.5.4의 채색으로 표현됨).

○ 북서태평양 블로킹으로 인해 깊어진 동아시아 기압골은 시베리아 고기압의 발달과 연관되어 한랭 아노말리가 강하게 나타났는데, 이는 잠재적 동아시아 한파 및 약기상 발생을 야기시킬 수 중요한 요소이다. 한편 아노말리 근거 방법들은 북미에서 유의한 한랭 아노말리를 보여주고 있는데, 이는 북서태평양 블로킹이 유도한, 극에서부터 오는 한랭이류로 인해 생긴 시그널로 추정된다. 이렇게 다양한 블로킹 탐지기법의 상세비교를 통해 한파 관련 블로킹 역학적 원리 이해 및 극한 기후 예측성 향상에 기여할 수 있음을 보여준다.

Table. 3.5.3 Eastern North Pacific blocking characteristics determined by four detection methods

DJF	HYB index	ANO index	LOC index	LAR index
Number of blocking events	101	135	73	106
Number of blocking days	767	1200	504	850
Mean blocking duration	7.6	8.9	6.9	8.0

○ 이번에는 북동태평양에서 발생하는 블로킹 특성을 살펴보기 위해, 각 탐지방법별 블로킹 특징들을 Table. 3.5.3에 나타냈었다. 가장 많은 이벤트 수를 기록했던 것은 13.5개의 아노말리 방법이었으며, 가장 적은 이벤트 수는 73개의 로컬 역전 방법

이었다. 또한 평균 duration 측면에서도 유사한 경향을 보였는데, 그 중 가장 긴 duration을 가진 것은 8.9일의 아노말리 방법이었으며, 가장 짧은 duration은 6.9의 로컬 역전 방법이였다.

○ Fig. 3.5.5는 북동태평양 블로킹이 발생했을 때의 대기순환장에 관한 합성도를 나타낸 것으로, 블로킹이 발생했을 때 4가지 방법 모두 중층 기압능이 북서쪽방향의 극지역 방향으로 치우쳐지고, 중층 기압골은 얕아지면서 깊어지는 양상을 보이는데, 즉 이러한 패턴은 북서태평양과 마찬가지로 저기압성 순환의 파동(cyclonic waviness)을 보여주고 있다. 그 중 가장 강한 저기압성 순환의 파동을 보여주는 것은 대규모 역전 방법이였다.

○ 이 때, 중층 지위고도 아노말리의 변화는 4가지 방법 모두 알래스카 지역의 고기압 아노말리-저위도 저기압 아노말리-북미 저기압 아노말리가 분포하고 있는데, 다시 말해, 뚜렷한 wave-train 양상을 보이는데, 이는 적도로부터 전파되는 teleconnection-like pattern으로 보인다. 일반적으로 동태평양 지역의 teleconnection은 PNA 패턴과 북동태평양 블로킹의 높은 연관성이 알려져 있으며 (Renwick and Wallace 1996; Wallace and Gutzler 1981), 강한 low frequency eddies로 인한 블로킹 형성이 많이 일어날 수 있는 지역이다.

○ 또한 4가지 방법 모두 알래스카 지역을 중심으로 강한 고온이 자리잡고 있으며, 이 때 북동태평양 블로킹 오른쪽에서의 북극에서 전해져오는 한랭이류로 인해 북미지역에 매우 강한 한랭 아노말리가 생성됨을 확인할 수 있다. 즉, 북동태평양 지역에서 블로킹이 많이 발생하면, 블로킹으로 인해 유도된 한랭이류로 인해 북미 지역에 강력한 한파가 발생할 수 있음을 보여준다.

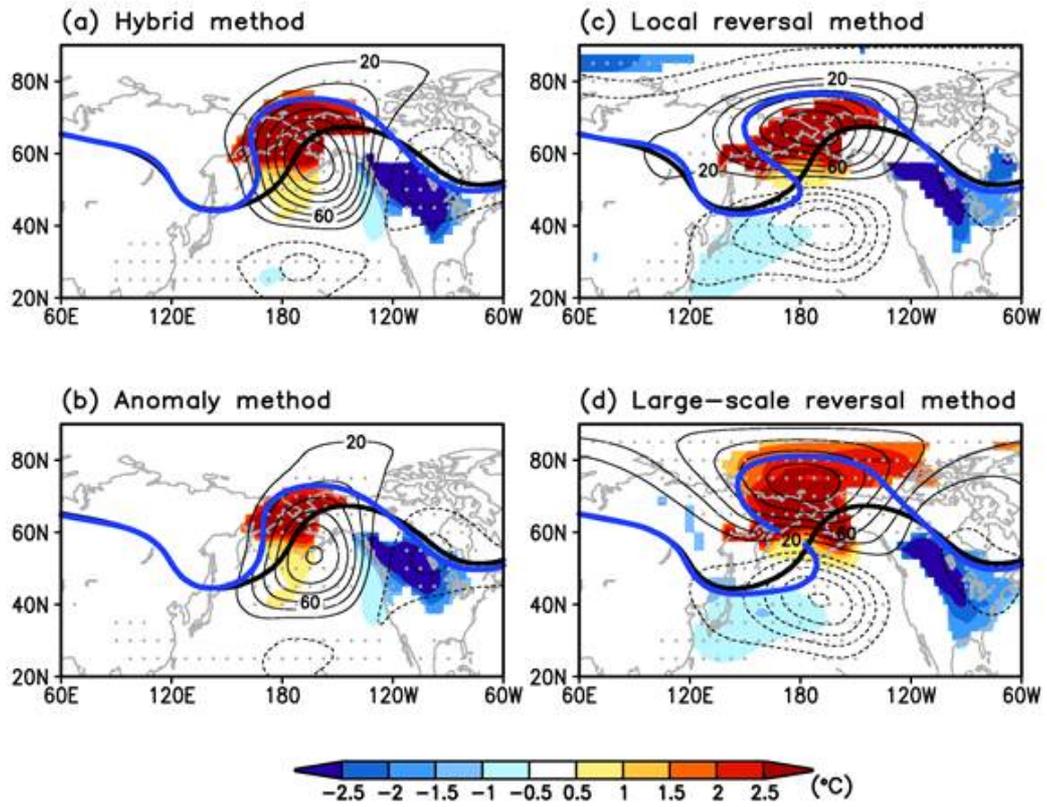


Fig. 3.5.5 블로킹 탐지 방법에 따른 북동태평양 (180-120W) 지역의 대기 순환 합성도. 지상기온 아노말리 (채색) 5220m (두꺼운 등치선) 중층 지위고도 아노말리 (얇은 등치선)

3.6 한파 발생 및 강화 역학 이해 심화

3.6.1 블로킹 및 한파 발생 조건과 배경 기작 분석

○ 2014년 2월 5일에 발생(onset)했던 북서태평양 블로킹은 23일 동안 지속되었는데, 이 때 블로킹이 발생하기 하루 전부터 북서태평양 및 캄차카 지역에 오메가 형태의 파동이 뚜렷하게 나타났으며, 그 중 블로킹 발생일에 cyclonic Rossby wave breaking이 뚜렷하게 나타났음을 Fig. 3.6.1에서 확인할 수 있다.

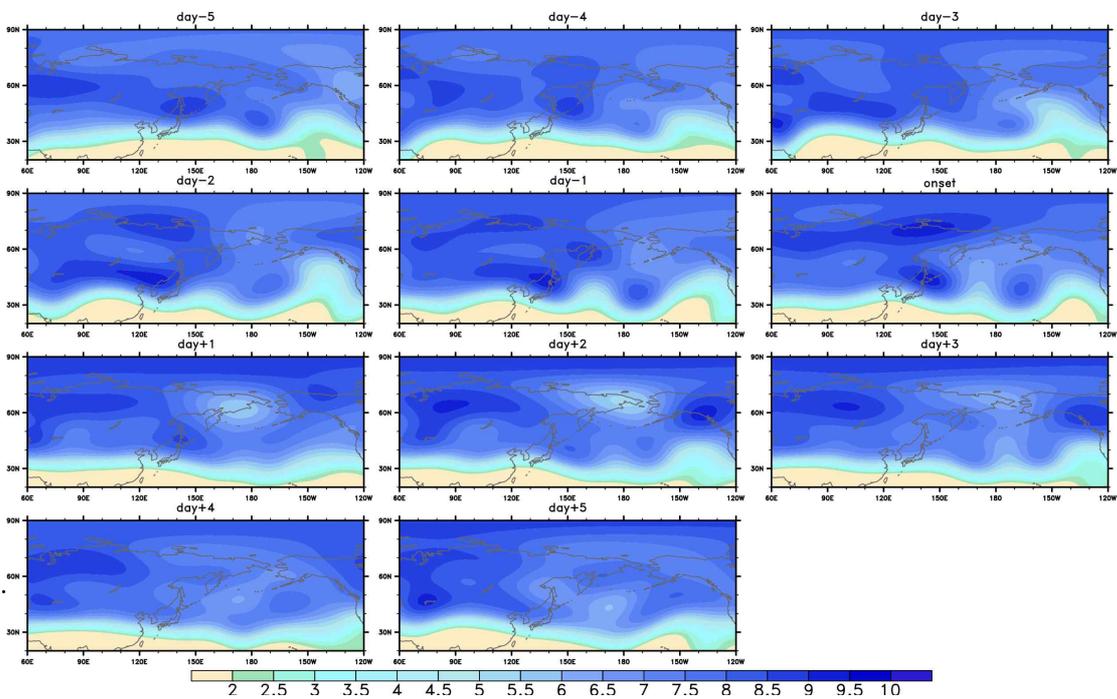


Fig. 3.6.1 2014년 2월 5일에 발생(onset)했던 블로킹의 발생 5일 전부터 5일 후까지의 등온위면(350K)에서의 잠재와도(단위: PVU)

○ 서울 관측자료 기준으로, 2018년 1월 23일에 한파가 발생하였으며, 이는 5일 동안 지속되었는데, 한파 발생 하루 전부터 고위도로부터 한랭한 기류의 이동이 발생하였다.

○ 한파 발생일에 북서태평양 지역에서 cyclonic Rossby wave breaking이 크게 나타났으며, 한파 발생 5일 후까지 강한 잠재와도가 한반도 북서쪽에 지속적으로 존재하는 것을 Fig. 3.6.2에서 볼 수 있다.

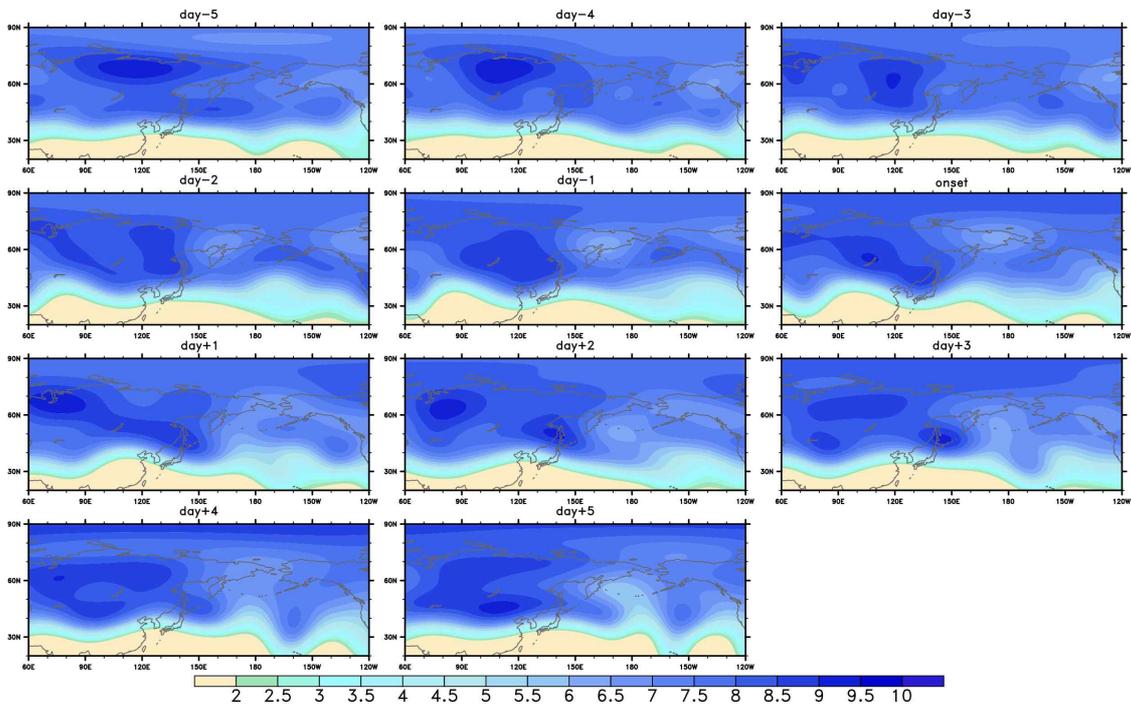


Fig. 3.6.2 2018년 1월 23일에 발생(onset)했던 한파 발생 5일 전부터 5일 후까지의 등온위면(350K)에서의 잠재와도(단위: PVU)

극지연구소

3.6.2 2017/18년 겨울철 한파 예측 제시 및 평가

Contents

대기모델(NCAR CAM4.0)

지면모델(NCAR CLM4.0)

NCEP CFS v2 해수면온도 변환 모듈

NCEP CFS v2 해빙 변환 모듈

S-EOF 기반 해빙 예측경계조건 생성 모듈

해상도 : $1.5^\circ \times 1.5^\circ$

Hindcast : 2001/11 – 2015/02 (14-year)

Fig. 3.6.3 극지연구소의 기후예측시스템

○ 당해연도 (2017/18년) 겨울철 한파 예측을 실시하기 위해, Fig. 3.6.3과 같이 NCAR 모델을 기반으로 한 기후예측시스템을 구성하여 계절 예측을 실험하였다. 이 때, 모델의 예측결과와 비교하기 위해 일본기상청에서 제공하는 Japanese 55-year Reanalysis (JRA55) 자료(Kobayashi et al., 2015)를 이용하였다.

○ 모델의 예측결과는 재분석자료 보다 따뜻할 것으로 예측하였지만, 2017년 12월의 경우 한반도 동쪽은 춥고 서쪽은 따뜻하며, 2018년 1월과 2월은 북쪽이 춥고 남쪽은 따뜻할 것으로 예측하였는데, 이는 재분석과 상당히 유사한 패턴이다. 즉, 절대적인 온도 아노말리 크기의 예측보다는 공간적인 패턴 예측 측면에서 좋은 성능을 보였다(Fig. 3.6.4).

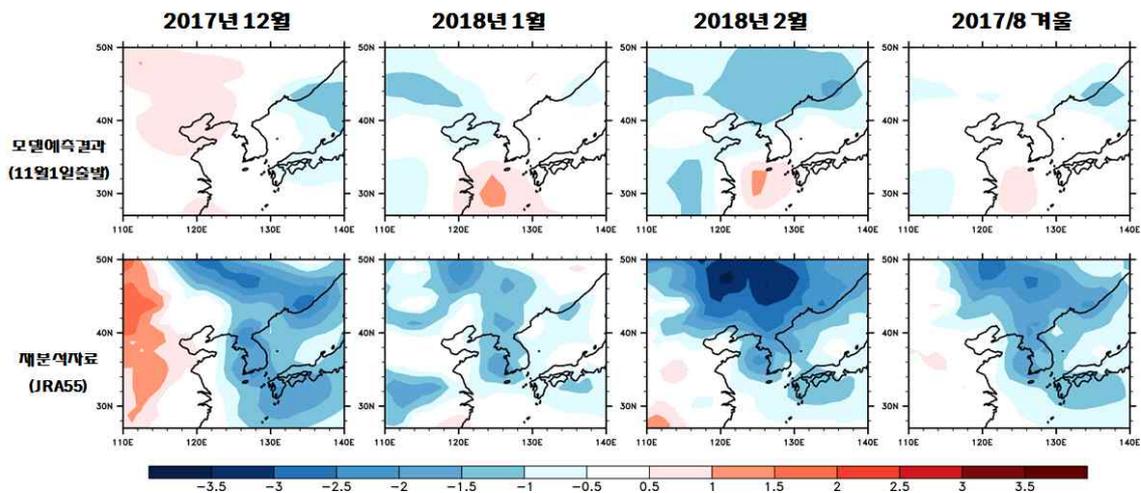


Fig. 3.6.4 극지연구소의 기후예측시스템으로 예측한 2017/18년 겨울철 기온 아노말리(단위: K)

제 4 장 연구개발
목표 달성도 및
대외 기여도



제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

○ 연구개발 목표 달성도

구분	연도	세부연구개발 목표	달성도	평가의 착안점 및 기준
1차년도	2015	한파 발생과 중위도 블로킹 관련성 이해	100 %	한반도 한파 발생에 동반되는 대기 패턴 특성 분석 여부
		극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해	100 %	한파 발생 시의 극와도 특징 제시 여부
2차년도	2016	역학 모형의 블로킹 모의 특성 분석	100 %	역학 모형의 블로킹 발달 특이성 및 빈도 특징 제시 여부
		극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 (계속)	100 %	한파 발생에 대한 대기 상-하층 상호작용 메커니즘 제시 여부
3차년도	2017	지면조건에 따른 블로킹 발달 특성 및 극기후값 변동성 분석	100 %	역학 모형 내 지면조건 변화 실험 여부 및 극기후값 분포 특징 제시 여부
		한파 발생 및 강화 역학 이해 심화	100 %	한파 강화 배경 조건 및 메커니즘 제시 여부
최종평가	2017	겨울철 한반도 한파 발생 및 강화 역학 제시	100 %	한반도 내습 한파에 대한 상층 대기 기여도 분석 및 발생 역학 과정 제시 여부
		역학 모형 내 극기후값 변동 특성 이해	100 %	지면 조건에 따른 극기후값 변동 특성 이해 여부
		당해 겨울철의 지면조건과 블로킹 강도 평가 및 한파 발생률과 관련성 분석	100 %	2015/16, 2016/17, 2017/18 년 겨울 기상 특이점 이해 및 원인 제시 여부

○ 연구개발 대외 기여도

- 선진국에서의 기술 도입이 불가능한 특수 분야에서 동아시아 및 한반도 계절 예측에

특화된 독자적 기술력 확보함

- 극한 기상 현상의 역학적 원리 이해에 기반하여 타 지역 악기상 발생 예측에 대한 기술 개발에 활용 가능함
- 한파, 폭설과 같은 겨울철 극한 기상현상 발생의 사전 예측 능력 강화로 사회·경제적 피해 저감에 기여함
- 기후 변화에 기인한 겨울철 기후 특성 변동에 대한 예측 잠재력 강화로 기후변화 적응 대책 수립에 기여함



The image features a large, light blue watermark of the KODPA logo in the background. The logo consists of the letters 'KODPA' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or network diagram below it. The text '제 5 장 기술개발' is positioned above the watermark, and '결과활용계획' is positioned below it, both in a black, sans-serif font.

제 5 장 기술개발
결과활용계획



제 5 장 기술개발 결과 활용계획

- 한반도 겨울철 한파 역학에 대한 근본적인 이해를 통해 계절 예측성 향상을 위한 기반 확립
- 한반도 겨울철 한파 발생에 있어 중요한 주변 인자들에 대한 체계적 이해를 통해 계절 예측 사후분석 능력 향상
- 겨울철 극한 기상 현상에 대한 역학적 이해도 제고를 통해 극한 한파 발생 시 강도 예측 및 원인 분석에 활용
- 블로킹 등 겨울철 한파를 강화시키는 요인에 대한 계절 평균장 강제조건 분석을 통해, 한반도 악기상 빈도에 대한 계절 예측률 향상에 기여
- 북서태평양 블로킹의 역학적 기원을 이해하기 위해 향후 원격상관(Tele-connection)패턴과의 관계에 대한 심층 분석 연구가 필요
- 북반구 지역별 블로킹 특징 분석에서 더 나아가, 관측자료가 희박한 남극 지역에 대해서도 마찬가지로 적용할 수 있기 때문에, 다양한 탐지방법에 따른 남극 블로킹 특징 및 모델 모의 성능 비교 연구가 필요
- 여러 블로킹 탐지 코드 기술의 자체 보유로 인해 최신 기후모델의 북극-중위도 기후 모의 성능 검증과 개선에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대
- 기존 블로킹 탐지 방법들에 대한 단점 및 에러를 최소화시킨, 새로운 블로킹 탐지 코드를 향후 개발할 예정

제 6 장 연구개발
과정에서 수집한
해외과학기술 정보



제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술 정보

- 외부 강제력 변동에 따른 블로킹 발생 특성 연구
 - NCEP/NCAR 재분석 자료 (daily 및 monthly), ERA-Interim 고해상도(0.75도 격자) 자료(6 hourly, daily 및 monthly), JRA55 재분석 (1.25도 격자) 자료, Met office Hadley Centre 해수면온도 및 해빙 면적 자료, NOAA 유라시아 강설 면적 자료 등 최신 해외 관측 및 재분석자료들을 활용해 모델 결과와 비교하였음.
 - 해외 학술 및 연구학회에서는 finite volume 역학코어에서 polar filter, singularity와 같은 문제점들로 인해 북극 환경을 제대로 모의하지 못한다고 활발히 논쟁중임. 이러한 중요성에 입각하여 본 연구에서는 다양한 역학코어에 따른 블로킹 모의를 정량적으로 분석을 수행하였음.
- 2017 European Geosciences Union(EGU) 학술대회를 통해 현 기후 모델들이 블로킹을 모의하는데 있어 여전히 부족한 성능을 보여주고 있으나, 상층 온도 경도의 변화가 북극온난화보다 블로킹 역학에 있어 중요하며, 미래기후에서 대부분의 모델들이 블로킹 감소로 예측하고 있는데, 이는 대체로 mean state 변화의 기여가 크다고 주장하였음.
- 극와도 분석을 통한 한파 발생 역학 이해 연구를 위해, Warm Arctic-Cold Eurasia (WACE) pattern이 블로킹과 어떤 관련성이 있는지 분석하던 중 Luo et al. (2016)을 발견하여 연구 방향을 수정하였음.
 - 기존 선행연구 Mori et al. (2014)에서 제시된 것처럼, WACE 패턴이 북극해빙 감소와 밀접한 관련이 있기 때문에, 해빙감소로 인해 북극 온난화가 우랄블로킹의 발생에 어떻게 기여하는지를 본 연구와 Luo et al. (2016)이 겹치는 부분이 있었음.
 - 이에 연구방향을 변경하여 WACE 패턴의 자연변동성이라는 특성을 강조하여, WACE 패턴의 기원에 대해 대기 장기변동성 측면으로 분석을 실시하였고, 그

결과 특정 시기에 주기적으로 대서양에서 전파되는 로스비 파열로 인해 북극-고위도 우랄 지역에 고기압 아노말리가 형성되면서 우랄 블로킹-WACE의 관계가 증가함을 발견하였음.





제 7 장 참고 문헌



제 7 장 참고문헌

- Barriopedro, D., García-Herrera, R., and Trigo, R.M., 2010, Application of blocking diagnosis methods to general circulation models. Part I: A novel detection scheme, *Clim. Dyn.*, 35, 1373 - 1391, doi:10.1007/s00382-010-0767-5.
- Collins, W. D., Bitz, C. M., Blackmon, M. L., Bonan, G. B., Bretherton, C. S., Carton, J. A., and Kiehl, J. T., 2006, The community climate system model version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, 19(11), 2122-2143.
- Compo, G. P., and Coauthors, 2011: The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 1 - 28, doi:10.1002/qj.776.
- Davini, P., Cagnazzo, S. Gualdi, and A. Navarra, 2012, Bidimensional diagnostics, variability and trends of Northern Hemisphere blocking, *J. Clim.*, 25, 6496 - 6509, doi:10.1175/JCLI-D-12-00032.1.
- Dole, R., and N. Gordon, 1983, Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics, *Mon. Weather Rev.*, 111, 1567 - 1586.
- Dunn-Sigouin, E., Son, S.W., and Lin, H., 2013, Evaluation of Northern Hemisphere Blocking Climatology in the Global Environment Multiscale Model. *Mon. Weather Rev.*, 141, 707 - 727, doi:10.1175/MWR-D-12-00134.1.
- Jun, S.-Y., Choi, S.J., and Kim, B.M., 2018, Dynamical core in atmospheric model does matter in the simulation of Arctic climate. *Geophysical Research Letters*, 45, 2805 - 2814. <https://doi.org/10.1002/2018GL077478>.
- Jung, O., Sung, M., Sato, K., Lim, Y., Kim, S., and Baek, E., 2017, How does the SST variability over the western North Atlantic Ocean control Arctic warming over the Barents - Kara Seas ? *Environ. Res. Lett.*, 12, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5f3b>.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437 - 471.

- Kim, B. M., Son, S. W., Min, S. K., Jeong, J. H., Kim, S. J., Zhang, X., Shim, T., and Yoon, J. H., 2014, Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nat. Commun.*, 5, 4646, doi:10.1038/ncomms5646.
- Kim, B. M., Hong, J. Y., Jun, S. Y., Zhang, X., Kwon, H., Kim, S. J., and Kim, H. K., 2017, Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016: Critical role of an Atlantic windstorm. *Scientific reports*, 7, 40051.
- Kim, S. H., and K. J. Ha, 2015, Two leading modes of Northern Hemisphere blocking variability in the boreal wintertime and their relationship with teleconnection patterns, *Clim. Dyn.*, 44, 2479 - 2491, doi:10.1007/s00382-014-2304-4.
- Kim, Y., Choi, Y. S., Kim, B. M., & Kim, H., 2016, Influence of altered low cloud parameterizations for seasonal variation of Arctic cloud amount on climate feedbacks. *Climate Dynamics*, 47(5-6), 1661-1672.
- Kobayashi, S. and Coauthors, 2015, The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Met. Soc. Jap.* 93, 5 - 48.
- Kug, J. S., Jeong, J. H., Jang, Y. S., Kim, B. M., Folland, C. K., Min, S. K., and Son, S. W., 2015, Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geoscience*, 8(10), 759.
- Kushnir, Y., 1987, Retrograding wintertime low-frequency disturbances over the North Pacific Ocean, *J. Atmos. Sci.*, 44, 2727 - 2742.
- Luo, D., Y. Xiao, Y. Yao, A. Dai, I. Simmonds, and C. L. E. Franzke, 2016, Impact of Ural Blocking on Winter Warm Arctic - Cold Eurasian Anomalies. Part I: Blocking-Induced Amplification. *J. Clim.*, 29, 3925 - 3947, doi:10.1175/JCLI-D-15-0611.1.
- Neale, R. B., Chen, C.-C., Gettelman, A., Lauritzen, P. H., Park, S., Williamson, D. L., et al., 2012, Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0). NCAR Tech. Note NCAR/TN-486+ STR. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research.
- Mantua, N. J., and S. R. Hare, 2002, The Pacific decadal oscillation, *J. Oceanogr.*, 58(1), 35 - 44.

- Masato, G., B. J. Hoskins, and T. Woollings, 2013, Wave-breaking characteristics of Northern Hemisphere winter blocking: A two-dimensional approach, *J. Clim.*, 26, 4535 - 4549.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, 2014, Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat. Geosci.*, 7, 869 - 874, doi:10.1038/ngeo2277.
- Park, S., 2014, A unified convection scheme (UNICON): Part I: Formulation, *J. Atmos. Sci.*, 71(11), 3902 - 3930.
- Pelly, J. L., and B. J. Hoskins, 2003, A new perspective on blocking, *J. Atmos. Sci.*, 60, 743 - 755, doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2.
- Renwick, J.A, and Wallace, J.M., 1996, Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Niño, and the PNA pattern. *Mon Weather Rev*, 124, 2071 - 2076.
- Sausen, R., W. Konig, and F. Sielman, 1995, Analysis of blocking events from observations and ECHAM model simulations, *Tellus*, 47A, 421 - 438.
- Sung, M. K., Lim, G. H., Kug, J. S., and An, S. Il, 2011, A linkage between the North Atlantic Oscillation and its downstream development due to the existence of a blocking ridge. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116, 1 - 10, doi:10.1029/2010JD015006.
- Sung, M. K., Kim, B. M., Baek, E. H., Lim, Y. K., and Kim, S. J., 2016, Arctic-North Pacific coupled impacts on the late autumn cold in North America. *Environmental Research Letters*, 11(8), 084016.
- Sung, M. K., Kim, S. H., Kim, B. M., and Choi, Y. S., 2018, Interdecadal variability of the Warm Arctic and Cold Eurasia pattern and its North Atlantic origin. *Journal of Climate*, (2018).
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005, Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high, *J. Atmos. Sci.*, 62, 4441 - 4449.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998, The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res.*

Lett., 25, 1297, doi:10.1029/98GL00950.

Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990, On the operational predictability of blocking, Tellus A, 42, 343 - 365.

Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, Mon. Weather Rev., 109, 784 - 812.



부록A. 블로킹 탐지를 위한 하이브리드 방법의 메인 코드

program block_index

! Written by Etienne Dunn-Sigouin

! July 28th, 2010

! NOTE: critical parameters are found in "qq.h"

! NOTE2: Anomalies and amplitude thresholds are calculated using
SKSanomaly.F

! Rewritten by Seon-Hwa Kim

! Jan. 2018

#include "qq.h"

#include "netcdf.inc"

c VARIABLES////////////////////////////////////

! THRESHOLDS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Standard deviation level

real:: sigma=1.5

! Amplitude array (gpm)

integer, dimension(12)::A

! Duration (days)

integer:: D=5

! Spatial scale (million Km²)

integer:: S=2.5*10**6

! Overlap

real:: O=0.5

! Mean zonal and Meridional scales (degrees)

integer:: dphi=15,dlambda=15

! Z500 gradient

```

real:: sgrad=0

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Z500-hPa
real, dimension(ix,il,maxdaylim):: z
! Z500-hPa anomaly
dimension:: anz(ix,il)
! Area represented by each grid point
dimension:: pixarea(ix,il)
! Min and Max labels for present and past day
integer, dimension(2,2):: nlabel
! Block label maps for current and past day
real, dimension(ix,il)::clabel,plabel
! Duration of each block by year
integer, dimension(lim,nyr):: dur
! Duration of each block by month & year
integer, dimension(12,lim,nyr)::mdur
! Onset date of each block by month & year
integer, dimension(lim,nyr)::onset
! Filename
integer:: f,i,j,nday,be,be_djf,ber_djf
! Date tracking variables
integer:: iyear,imon,iday,m,yrtype,maxday
integer, dimension(12):: lmonth

integer:: maxlabel ! tracks the maximum label in ENTIRE (all times) label
array

c  START //////////////////////////////////////
! Calculating area array

```

```

! (area covered by each grid point)
call areacalc(pixarea)

do f=11,11 ! file number
! INITIALIZING ARRAYS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
nlabel(1,1)=1
nlabel(2,1)=1
nlabel(1,2)=1
nlabel(2,2)=1

maxlabel=1

do i=1,12
  A(i)=0
  do j=1,nyr
    do nday=1,lim
      dur(nday,j)=0
      mdur(i,nday,j)=0
      onset(nday,j)=0
    enddo
  enddo
enddo
do i=1,ix
  do j=1,iy
    anz(i,j)=0
    clabel(i,j)=0
    plabel(i,j)=0
    do nday=1,maxdaylim
      z(i,j,nday)=0
    enddo
  enddo
enddo

```



```

    enddo
enddo
iyear=nyear
iday=0
imon=1
m=1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! INPUT
! z500
call readnetcdf(f,maxday,yrtype,lmonth,z)
! Anomaly data
open(f,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
! Thresholds
open(f+20)
! Reading thresholds
do i=1,12
  read(f+20,*) A(i)
  A(i)=sigma*A(i)
  print*,A(i)
enddo
close(f+20)

!OUTPUT
! Label data
open(f+60,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)

! *****
!           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****

```

```

! *****
print*, ''
print*, 'File=',f
print*, 'Tracking anomalies...'

do nday=1,maxday

    call datetrack(lmonth,iday,imon,iyear,m,yrtype)
    ! Reading anomalies
    read(f,rec=nday) ((anz(i,j),i=1,ix),j=1,il)
    ! Calculate anomalies >= (A)
    call anomaly(anz,A(m))
    ! Assign unique labels to contiguous grid points
    call ccl(anz,clabel,nlabel,maxlabel)
    ! Remove anomalies with spatial scale < (S)
    call spatialthreshold(clabel,nlabel,S,pixarea,maxlabel)
    !print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
    ! Remove labels who do not satisfy GHG criteria
    call GHG(nlabel,clabel,z(:, :, nday),anz,sgrad,
&          dphi,dlambda,maxlabel)
    ! Assign same label to anomalies with >= (O)
    call overlap(nday,O,clabel,plabel,nlabel,maxlabel)
    !print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
    ! Record duration and onset date
    call stat3(clabel,nlabel,dur,onset,iyear,m,iday,nday)

    ! current max/min labels become past max/min labels
    nlabel(1,2)=nlabel(1,1)
    nlabel(2,2)=nlabel(2,1)

```

```

! Tracking the maximum label in the ENTIRE label array
! So that the first label on a new day starts at the maximum+1
! label. This is so that each different block has a unique label.
! By block I mean uniquely labeled anomaly after overlap.F
if (sum(clabel).GT.0) then
  if (maxval(clabel,mask=clabel.GT.0).GE.maxlabel) then
    maxlabel=maxval(clabel,mask=clabel.GT.0)+1
  endif
endif

do i=1,ix
  do j=1,il
    ! Current label becomes past label
    plabel(i,j)=clabel(i,j)
  enddo
enddo

! Writing label to file each day
write(f+60,rec=nday) ((clabel(i,j),i=1,ix),j=1,il)
enddo

close(f+60) ! finished writing lables to file
close(f)    ! close anomaly file

! Remove labels lasting <= (D) in label and distribution arrays
call durthresh(dur,onset,nlabel(2,1),D,f,yrtype,lmonth,maxday)

! *****
!           END           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
! *****

```

```

! *****
print*, 'Number of anomalies satisfying (A),(S),(O) & GHG ='
+      ,nlabel(2,1)
print*, 'Total number of blocks = ',count(mask=dur.GE.D)
print*, 'Finding distributions...'

!          BLOCK          CHARACTERISTIC          DISTRIBUTIONS
*****
! SORT BY each label *****
! Total duration
call ddist(dur,onset,nlabel(2,1),f,D,be)
! Winter duration [period : 39 yrs, >= D]
call wddist(lmonth,f,maxday,yrtype,D,be,be_djf)
! date
call bdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be)
! Winter date [period : 39 yrs, >= D]
call wbdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be_djf)
! SORT BY lat-lon grid *****
! season-mean frequency [period : 39 yrs]
call sfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)
! monthly-mean, annual frequency
call mfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)

print*, 'DONE'
print*, ''

enddo ! File number end

end program block_index

```

부록B. 블로킹 탐지를 위한 아노말리 방법의 메인 코드

```
program block_index

! Rewritten by Seon-Hwa Kim
! Jan. 2018

#include "qq.h"
#include "netcdf.inc"

c VARIABLES////////////////////////////////////
! THRESHOLDS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Standard deviation level
real:: sigma=1.5
! Amplitude array (gpm)
integer, dimension(12)::A
! Duration (days)
integer:: D=5
! Spatial scale (million Km^2)
integer:: S=2.5*10**6
! Overlap
real:: O=0.5
! Mean zonal and Meridional scales (degrees)
integer:: dphi=15,dlambda=15
! Z500 gradient
real:: sgrad=0

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Z500-hPa
real, dimension(ix,il,maxdaylim):: z
! Z500-hPa anomaly
```

```

dimension:: anz(ix,il)
! Area represented by each grid point
dimension:: pixarea(ix,il)
! Min and Max labels for present and past day
integer, dimension(2,2):: nlabel
! Block label maps for current and past day
real, dimension(ix,il)::clabel,plabel
! Duration of each block by year
integer, dimension(lim,nyr):: dur
! Duration of each block by month & year
integer, dimension(12,lim,nyr)::mdur
! Onset date of each block by month & year
integer, dimension(lim,nyr)::onset
! Filename
integer:: f,i,j,nday,be,be_djf,ber_djf
! Date tracking variables
integer:: iyear,imon,iday,m,yrtype,maxday
integer, dimension(12):: lmonth

integer:: maxlabel ! tracks the maximum label in ENTIRE (all times) label
array

c  START //////////////////////////////////////

! Calculating area array
! (area covered by each grid point)
call areacalc(pixarea)

do f=11,11 ! file number

```

! INITIALIZING ARRAYS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

nlabel(1,1)=1

nlabel(2,1)=1

nlabel(1,2)=1

nlabel(2,2)=1

maxlabel=1

do i=1,12

A(i)=0

do j=1,nyr

do nday=1,lim

dur(nday,j)=0

mdur(i,nday,j)=0

onset(nday,j)=0

enddo

enddo

enddo

do i=1,ix

do j=1,iy

anz(i,j)=0

clabel(i,j)=0

plabel(i,j)=0

do nday=1,maxdaylim

z(i,j,nday)=0

enddo

enddo

enddo

iyear=nyear

iday=0



```

imon=1
m=1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! INPUT
! z500
call readnetcdf(f,maxday,yrtype,lmonth,z)
! Anomaly data
open(f,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
! Thresholds
open(f+20)
! Reading thresholds
do i=1,12
  read(f+20,*) A(i)
  A(i)=sigma*A(i)
  print*,A(i)
enddo
close(f+20)

!OUTPUT
! Label data
open(f+60,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)

! *****
!           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****
! *****

print*, ''
print*, 'File=',f
print*, 'Tracking anomalies...'

```

```

do nday=1,maxday

    call datetrack(lmonth,iday,imon,iyear,m,yrtype)
    ! Reading anomalies
    read(f,rec=nday) ((anz(i,j),i=1,ix,j=1,il)
    ! Calculate anomalies >= (A)
    call anomaly(anz,A(m))
    ! Assign unique labels to contiguous grid points
    call ccl(anz,clabel,nlabel,maxlabel)
    ! Remove anomalies with spatial scale < (S)
    call spatialthreshold(clabel,nlabel,S,pixarea,maxlabel)
    !print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
    ! Remove labels who do not satisfy GHG criteria
    !call GHG(nlabel,clabel,z(:, :, nday),anz,sgrad,
    !&          dphi,dlambda,maxlabel)
    ! Assign same label to anomalies with >= (O)
    call overlap(nday,O,clabel,plabel,nlabel,maxlabel)
    !print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
    ! Record duration and onset date
    call stat3(clabel,nlabel,dur,onset,iyear,m,iday,nday)

    ! current max/min labels become past max/min labels
    nlabel(1,2)=nlabel(1,1)
    nlabel(2,2)=nlabel(2,1)

    ! Tracking the maximum label in the ENTIRE label array
    ! So that the first label on a new day starts at the maximum+1
    ! label. This is so that each different block has a unique label.
    ! By block I mean uniquely labeled anomaly after overlap.F

```

```

if (sum(clabel).GT.0) then
  if (maxval(clabel,mask=clabel.GT.0).GE.maxlabel) then
    maxlabel=maxval(clabel,mask=clabel.GT.0)+1
  endif
endif

do i=1,ix
  do j=1,il
    ! Current label becomes past label
    plabel(i,j)=clabel(i,j)
  enddo
enddo

! Writing label to file each day
write(f+60,rec=nday) ((clabel(i,j),i=1,ix),j=1,il)

enddo

close(f+60) ! finished writing lables to file
close(f)    ! close anomaly file

! Remove labels lasting <= (D) in label and distribution arrays
call durthresh(dur,onset,nlabel(2,1),D,f,yrtype,lmonth,maxday)

! *****
!           END           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****

! *****
print*, 'Number of anomalies satisfying (A),(S),(O) & GHG ='

```

```

+           ,nlabel(2,1)
print*, 'Total number of blocks = ',count(mask=dur.GE.D)
print*, 'Finding distributions...'

!           BLOCK           CHARACTERISTIC           DISTRIBUTIONS
*****
! SORT BY each label *****
! Total duration
call ddist(dur,onset,nlabel(2,1),f,D,be)
! Winter duration [period : 39 yrs, >= D]
call wddist(lmonth,f,maxday,yrtype,D,be,be_djf)
! date
call bdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be)
! Winter date [period : 39 yrs, >= D]
call wbdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be_djf)
! SORT BY lat-lon grid *****
! season-mean frequency [period : 39 yrs]
call sfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)
! monthly-mean, annual frequency
call mfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)

print*, 'DONE'
print*, ''

enddo ! File number end

end program block_index

```

부록C. 블로킹 탐지를 위한 로컬 역전 방법의 메인 코드

```
program block_index

! Rewritten by Seon-Hwa Kim
! Jan. 2018

#include "qq.h"
#include "netcdf.inc"

c VARIABLES////////////////////////////////////
! THRESHOLDS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Standard deviation level
real:: sigma=1.5
! Amplitude array (gpm)
integer, dimension(12)::A
! Duration (days)
integer:: D=5
! Spatial scale (million Km^2)
integer:: S=2.5*10**6
! Overlap
real:: O=0.5
! Mean zonal and Meridional scales (degrees)
integer:: dphi=15,dlambda=15
! Z500 gradient
real:: sgrad=0, ngrad=-10
! referece latitude
real:: reflat=50

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Z500-hPa
```

```

real, dimension(ix,il,maxdaylim):: z
! zonally-averaged MG Index
real, dimension(ix,il):: meanMGI,MGI
! Area represented by each grid point
dimension:: pixarea(ix,il)
! Min and Max labels for present and past day
integer, dimension(2,2):: nlabel
! Block label maps for current and past day
real, dimension(ix,il)::clabel,plabel
! Duration of each block by year
integer, dimension(lim,nyr):: dur
! Duration of each block by month & year
integer, dimension(12,lim,nyr)::mdur
! Onset date of each block by month & year
integer, dimension(lim,nyr)::onset
! Filename
integer:: f,i,j,nday,be,be_djf,ber_djf
! Date tracking variables
integer:: iyear,imon,iday,m,yrtype,maxday
integer, dimension(12):: lmonth

```

```

integer:: maxlabel ! tracks the maximum label in ENTIRE (all times) label
array

```

```

c  START //////////////////////////////////////

```

```

! Calculating area array
! (area covered by each grid point)
call areacalc(pixarea)

```

```

do f=11,11 ! file number

! INITIALIZING ARRAYS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
nlabel(1,1)=1
nlabel(2,1)=1
nlabel(1,2)=1
nlabel(2,2)=1

maxlabel=1

do i=1,12
  A(i)=0
  do j=1,nyr
    do nday=1,lim
      dur(nday,j)=0
      mdur(i,nday,j)=0
      onset(nday,j)=0
    enddo
  enddo
enddo

do i=1,ix
  do j=1,iy
    meanMGI(i,j)=0
    MGI(i,j)=0
    clabel(i,j)=0
    plabel(i,j)=0
    do nday=1,maxdaylim
      z(i,j,nday)=0
    enddo
  enddo
enddo

```



```

enddo
iyear=nyear
iday=0
imon=1
m=1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! INPUT
! z500
call readnetcdf(f,maxday,yrtype,lmonth,z)

!OUTPUT
! Label data
open(f+50,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
open(f+51,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
open(f+60,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
! *****
!           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****
! *****

print*, ''
print*, 'File=',f
print*, 'Tracking anomalies...'

do nday=1,maxday

    call datetrack(lmonth,iday,imon,iyear,m,yrtype)
    ! GHG reversal
    call reversal(meanMGI,MGI,z(:, :, nday),

```

```

&                                reflat,ngrad,sgrad,dphi,dlambda)
! Assign unique labels to contiguous grid points
call ccl(meanMGI,clabel,nlabel,maxlabel)
! Remove anomalies with spatial scale < (S)
call spatialthreshold(clabel,nlabel,S,pixarea,maxlabel)
!print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
! Assign same label to anomalies with >= (O)
call overlap(nday,O,clabel,plabel,nlabel,maxlabel)
!print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
! Record duration and onset date
call stat3(clabel,nlabel,dur,onset,iyear,m,iday,nday)

! current max/min labels become past max/min labels
nlabel(1,2)=nlabel(1,1)
nlabel(2,2)=nlabel(2,1)

! Tracking the maximum label in the ENTIRE label array
! So that the first label on a new day starts at the maximum+1
! label. This is so that each different block has a unique label.
! By block I mean uniquely labeled anomaly after overlap.F
if (sum(clabel).GT.0) then
  if (maxval(clabel,mask=clabel.GT.0).GE.maxlabel) then
    maxlabel=maxval(clabel,mask=clabel.GT.0)+1
  endif
endif

do i=1,ix
  do j=1,il
    ! Current label becomes past label
    plabel(i,j)=clabel(i,j)

```

```

        enddo
    enddo

    ! Writing label to file each day
    write(f+50,rec=nday) ((meanMGI(i,j),i=1,ix),j=1,il)
    write(f+51,rec=nday) ((MGI(i,j),i=1,ix),j=1,il)
    write(f+60,rec=nday) ((clabel(i,j),i=1,ix),j=1,il)

enddo

close(f+60) ! finished writing lables to file
close(f+51)
close(f+50)
c   close(f)   ! close anomaly file

! Remove labels lasting <= (D) in label and distribution arrays
call durthresh(dur,onset,nlabel(2,1),D,f,yrtype,lmonth,maxday)

! *****
!           END           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****
! *****

print*, 'Number of anomalies satisfying (A),(S),(O) & GHG ='
+       ,nlabel(2,1)
print*, 'Total number of blocks = ',count(mask=dur.GE.D)
print*, 'Finding distributions...'

!           BLOCK           CHARACTERISTIC           DISTRIBUTIONS
*****

! SORT BY each label *****

```

```

! Total duration
call ddist(dur,onset,nlabel(2,1),f,D,be)
! Winter duration [period : 39 yrs, >= D]
call wddist(lmonth,f,maxday,yrtype,D,be,be_djf)
! date
call bdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be)
! Winter date [period : 39 yrs, >= D]
call wbdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be_djf)
! SORT BY lat-lon grid *****
! season-mean frequency [period : 39 yrs]
call sfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)
! monthly-mean, annual frequency
call mfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)

print*, 'DONE'
print*, ''

enddo ! File number end

end program block_index

```



부록D. 블로킹 탐지를 위한 대규모 역전 방법의 메인 코드

```
program block_index
! Rewritten by Seon-Hwa Kim
! Jan. 2018

#include "qq.h"
#include "netcdf.inc"

c VARIABLES////////////////////////////////////
! THRESHOLDS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Standard deviation level
real:: sigma=1.5
! Amplitude array (gpm)
integer, dimension(12)::A
! Duration (days)
integer:: D=5
! Spatial scale (million Km^2)
integer:: S=2.5*10**6
! Overlap
real:: O=0.5
! Mean zonal and Meridional scales (degrees)
integer:: dphi=15,dlambda=15
! Z500 gradient
real:: sgrad=0
! referece latitude
real:: reflat=50

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Z500-hPa
real, dimension(ix,il,maxdaylim):: z
```

```

! Central latitude
real, dimension(ix,nmon):: cenlat

! zonally-averaged MG Index
real, dimension(ix,il):: meanMGI,MGI

! Area represented by each grid point
dimension:: pixarea(ix,il)

! Min and Max labels for present and past day
integer, dimension(2,2):: nlabel

! Block label maps for current and past day
real, dimension(ix,il)::clabel,plabel

! Duration of each block by year
integer, dimension(lim,nyr):: dur

! Duration of each block by month & year
integer, dimension(12,lim,nyr)::mdur

! Onset date of each block by month & year
integer, dimension(lim,nyr)::onset

! Filename
integer:: f,i,j,nday,be,be_djf,ber_djf

! Date tracking variables
integer:: iyear,imon,iday,m,yrtype,maxday

integer, dimension(12):: lmonth

integer:: maxlabel ! tracks the maximum label in ENTIRE (all times) label
array

```

```

c  START //////////////////////////////////////

```

```

! Calculating area array
! (area covered by each grid point)
call areacalc(pixarea)

```

```

do f=11,11 ! file number

! INITIALIZING ARRAYS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
nlabel(1,1)=1
nlabel(2,1)=1
nlabel(1,2)=1
nlabel(2,2)=1

maxlabel=1

do i=1,12
  A(i)=0
  do j=1,nyr
    do nday=1,lim
      dur(nday,j)=0
      mdur(i,nday,j)=0
      onset(nday,j)=0
    enddo
  enddo
enddo

do i=1,ix
  do j=1,iy
    meanMGI(i,j)=0
    MGI(i,j)=0
    clabel(i,j)=0
    plabel(i,j)=0
    do nday=1,maxdaylim
      z(i,j,nday)=0
    enddo
  enddo
enddo

```

```

        enddo
    enddo
    iyear=nyear
    iday=0
    imon=1
    m=1
    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! INPUT
! Z500
call readnetcdf(f,maxday,yrtype,lmonth,z)
! Central latitude
open(f+20,form='unformatted',access='direct',recl=ix*nmon*4)
read(f+20,rec=1) ((cenlat(i,j),i=1,ix),j=1,nmon)

!OUTPUT
! Label data
open(f+50,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
open(f+51,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)
open(f+60,form='unformatted',access='direct',recl=ix*il*4)

! *****

!           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****

! *****

print*, ''
print*, 'File=',f
print*, 'Tracking anomalies...'

do nday=1,maxday

```

```

call datetrack(lmonth,iday,imon,iyear,m,yrtype)
!print*,nday,maxval(cenlat(:,nday),mask=cenlat(:,nday).GT.0)
! GHG reversal
call reversal(meanMGI,MGI,z(:, :, nday),
&              cenlat(:,imon),sgrad,dphi,dlambda)
! Assign unique labels to contiguous grid points
call ccl(meanMGI,clabel,nlabel,maxlabel)
! Remove anomalies with spatial scale < (S)
call spatialthreshold(clabel,nlabel,S,pixarea,maxlabel)
!print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
! Assign same label to anomalies with >= (O)
call overlap(nday,O,clabel,plabel,nlabel,maxlabel)
!print*,nday,maxlabel,nlabel(1,1),nlabel(2,1)
! Record duration and onset date
call stat3(clabel,nlabel,dur,onset,iyear,m,iday,nday)

! current max/min labels become past max/min labels
nlabel(1,2)=nlabel(1,1)
nlabel(2,2)=nlabel(2,1)

! Tracking the maximum label in the ENTIRE label array
! So that the first label on a new day starts at the maximum+1
! label. This is so that each different block has a unique label.
! By block I mean uniquely labeled anomaly after overlap.F
if (sum(clabel).GT.0) then
  if (maxval(clabel,mask=clabel.GT.0).GE.maxlabel) then
    maxlabel=maxval(clabel,mask=clabel.GT.0)+1
  endif
endif
endif

```

```

do i=1,ix
do j=1,il
! Current label becomes past label
plabel(i,j)=clabel(i,j)
enddo
enddo

! Writing label to file each day
write(f+50,rec=nday) ((meanMGI(i,j),i=1,ix),j=1,il)
write(f+51,rec=nday) ((MGI(i,j),i=1,ix),j=1,il)
write(f+60,rec=nday) ((clabel(i,j),i=1,ix),j=1,il)

enddo

close(f+60) ! finished writing lables to file
close(f+51)
close(f+50)
close(f+20) ! close cenlat file

! Remove labels lasting <= (D) in label and distribution arrays
call durthresh(dur,onset,nlabel(2,1),D,f,yrtype,lmonth,maxday)

! *****
!           END           BLOCK           TRACKING           ALGORITHM
*****
! *****

print*, 'Number of anomalies satisfying (A),(S),(O) & GHG ='
+      ,nlabel(2,1)

```

```
print*, 'Total number of blocks = ',count(mask=dur.GE.D)
print*, 'Finding distributions...'
```

```
!          BLOCK          CHARACTERISTIC          DISTRIBUTIONS
```

```
*****
```

```
! SORT BY each label *****
```

```
! Total duration
```

```
call ddist(dur,onset,nlabel(2,1),f,D,be)
```

```
! Winter duration [period : 39 yrs, >= D]
```

```
call wddist(lmonth,f,maxday,yrtype,D,be,be_djf)
```

```
! date
```

```
call bdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be)
```

```
! Winter date [period : 39 yrs, >= D]
```

```
call wbdate(lmonth,f,maxday,yrtype,be_djf)
```

```
! SORT BY lat-lon grid *****
```

```
! season-mean frequency [period : 39 yrs]
```

```
call sfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)
```

```
! monthly-mean, annual frequency
```

```
call mfdist(lmonth,f,maxday,yrtype)
```

```
print*, 'DONE'
```

```
print*, ''
```

```
enddo ! File number end
```

```
end program block_index
```

부록E. 로컬 역전 방법의 로컬 역전을 탐지하는 일부 코드

```
subroutine reversal(meanMGI,MGI,z,reflat,ngrad,sgrad,dphi,dlambda)

#include "qq.h"

! seonhwal2@kopri.re.kr

! This subroutine computes meridional gradient reversals
! from grid point-based (TM type) field inversions.

! Zonal and meridional scales
integer:: dphi,dlambda
! Z500 gradient criteria
real:: ngrad,sgrad
! Reference latitude
real:: reflat
! Zonal index
real, dimension(ix,il):: z,MGI,meanMGI
! Gradient
real:: GHGN,GHGS
! Periodic boundary function
integer, external:: pbdry

integer:: c, maxlabel

integer:: hj,lj,li,ri,jref,jhref,ii,i,j

MGI=0.
meanMGI=0.
jref=nint((reflat+90)/latres)      !56 (fixed)
!jhref=jref+((3*dphi)/(2*latres))  !65 (fixed)
```

```

jhref=il-nint(dphi/latres)          !67
!print*, 'jref = ', jref, jhref

do i=1,ix
  do j=jref,jhref
    hj=j+nint(dphi/latres)
    lj=j-nint(dphi/latres)

    ! local meridional gradient
    ! from two-grid points
    GHGN=0.
    GHGS=0.
    GHGN= ( z(pbdry(i,hj))-z(pbdry(i,j)) ) /
&          nint(dphi/latres)
    GHGS= ( z(pbdry(i,j)) -z(pbdry(i,lj)) ) /
&          nint(dphi/latres)

    ! Block
    if( (GHGN.le.ngrad).and.(GHGS.ge.sgrad) ) then
      MGI(i,j)=GHGS
    ! non-Block
    else
      MGI(i,j)=0.
    endif

    meanMGI=MGI
    !print*,i,j,hj,lj !,GHGN,GHGS,MGI(i,j) !,meanMGI(i,j)
  enddo
enddo

```

```
return
end subroutine reversal
```

```
integer function pbdry(i)
```

```
#include "qq.h"
```

```
! maintains periodicity of longitudinal values
```

```
integer:: i
```

```
integer:: dummy
```

```
if (i.GT.ix) then
```

```
  dummy = i-ix-1
```

```
  pbdry=1+dummy
```

```
elseif (i.LT.1) then
```

```
  dummy = i-1+1
```

```
  pbdry=ix+dummy
```

```
else
```

```
  pbdry=i
```

```
endif
```

```
end function pbdry
```

부록F. 대규모 역전 방법의 대규모 역전을 탐지하는 일부
코드

```
subroutine reversal(meanMGI,MGI,z,cenlat,sgrad,dphi,dlambda)
#include "qq.h"
! seonhwa12@kopri.re.kr
! This subroutine computes meridional gradient reversals
! from averaged (PH type) field inversions.

! Zonal and meridional scales
integer:: dphi,dlambda
! Z500 gradient criteria
real:: sgrad
! Reference latitude
!real:: reflat
! Central latitude
real, dimension(ix):: cenlat
! Zonal index
real, dimension(ix,il):: z,MGI,meanMGI
! Dummy Variables
real:: HZ,LZ
! Periodic boundary function
integer, external:: pbdry

integer:: c, maxlabel

integer:: hj,lj,li,ri,jref,jhref,i,j

!do i=1,ix
! jref=nint((cenlat(i)+90.)/latres) ! Northern Hemisphere
```

```

! jhref=jref+((3*dphi)/(2*latres))
! if(jhref.gt.il-nint(dphi/latres)) jhref=il-nint(dphi/latres)
! print*,i,cenlat(i),jref,jhref,il
!end do

MGI=0.
meanMGI=0.

do i=1,ix
  jref =nint((cenlat(i)+90.)/latres) ! Northern Hemisphere
  jhref=jref+((3*dphi)/(2*latres))
  if(jhref.gt.il-nint(dphi/latres)) jhref=il-nint(dphi/latres)

  do j=jref,jhref
    hj=j+nint(dphi/latres)
    lj=j-nint(dphi/latres)

    ! large-scale meridional gradient
    ! from averaged-fields
    HZ=0.
    LZ=0.
    HZ=sum(z(pbdry(i),j:hj))
    LZ=sum(z(pbdry(i),lj:j))
    MGI(i,j)= (HZ-LZ) / nint(dphi/latres)

    if (MGI(i,j).LT.sgrad) MGI(i,j)=0

    meanMGI=MGI
    !print*,i,j,meanMGI(i,j)
  enddo
enddo

```

```

        enddo

        return
    end subroutine reversal

    integer function pbdry(i)

#include "qq.h"

! maintains periodicity of longitudinal values

integer:: i
integer:: dummy

if (i.GT.ix) then
    dummy = i-ix-1
    pbdry=1+dummy
elseif (i.LT.1) then
    dummy = i-1+1
    pbdry=ix+dummy
else
    pbdry=i
endif

end function pbdry

```

부록G. 대규모 역전 방법 이용을 위한 블로킹 위도 탐지하는

코드

```
; Date : 20170711
; seonhwa12@kopri.re.kr

begin
load "./my_functions.ncl"

;-----
; namelist
;-----

indir      = "/data/shkim/ncep/hgt/day/code_TM/1950-1989/"
infile_name = indir+"ncep.z500.day.19500101.19891231.nc"
var_name    = ("/hgt/")
odir       = "./"
ofile_name  = odir+"filter.bin"

slat  = 30.0
elat  = 90.0
slon  = 0.0
elon  = 360.0

stime = 19500115      ; specify a start date
etime = 19500118

dayskip = 5          ; frequency of plotting
plottype = "png"      ; send graphics to PNG file
plotname = "bfband"
```

```

;_____ filter
ihp      = 1                ; low_pass = 0 ; high-pass = 1 ; band-pass = 2
nwgt     = 11              ; must be odd # ; loose 11 days each end
ca       = 5                ; 5 days
cb       = -999

fca      = 1.0/ca
fcb      = cb

;-----
; read infiles
;-----

infile   = addfile(infile_name,"r") ; bring infile
lat      = infile->lat
lon      = infile->lon
lev      = infile->level
nlat     = dimsizes(lat)
nlon     = dimsizes(lon)
nlev     = dimsizes(lev)

var       = short2flt(infile->$var_name$(:,0,:,:) ) ;
var@_FillValue= -999
dimvar    = dimsizes(var)
ndimvar   = dimsizes(dimvar)
time      = infile->time
ntim     = dimsizes(time)

;print(dimvar)
;print(ndimvar)

```

```

; printMinMax(var(:,:,:),0)
; debug_plot(var(0,0,:,:),100)
; debug_tm_series(var(:,0,50,60))

;-----
; calendar
;-----

date      = cd_calendar(time,0)
year      = tointeger(date(:,0))
month     = tointeger(date(:,1))
;month_abbr = (/"","Jan","Feb","Mar","Apr","May","Jun","Jul","Aug","Sep", \
;             "Oct","Nov","Dec"/)
;day      = tointeger(date(:,2))
;nday     = (/31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31/)
;abc      = sprinti("%0.2i ", day) + sprinti("%0.2i",month) + \
;         month_abbr(month) + " " + sprinti("%0.4i", year)

;yyyymmdd = cd_calendar(time,-2)
;yrfrac   = yyyymmdd_to_yyyyfrac (yyyymmdd, 0)
;delete( [/yrfrac@long_name/] )

;ind_stime = ind(yyyymmdd.eq.stime)      ; user specified dates

;-----
; cosine of the latitude weighting
;-----

pi      = 4.0 * atan(1.0)
rad     = (pi / 180.0)
coslat  = cos(lat * rad)      ; cosine of latitude

```

```

do j = 0, nlat-1
    var(:,j,:) = var(:,j,:) * coslat(j)
end do

;-----
; Lanczos filter
;-----

sigma = 1.0                ; Lanczos sigma 1 is common
opt   = 0                  ; end-point opt 0 is common
dim   = 0                  ; on the time-dimension

wgt   = filwgts_lanczos (nwgt, ihp, fca, fcb, sigma )
dat   = wgt_runave_n_Wrap(var, wgt, opt, dim) ; filtered file

;___writing file
system("/bin/rm -f "+ofile_name)
do it = 0, ntim-1
    fbindirwrite(ofile_name,dat(it,:))
end do

;-----
; Variance = (deviation)**2
;-----

do it = ca, ntim-ca-1
    dat(it,:)=dat(it,:)*dat(it,:)
    ;print("it = "+it)

```

```

end do

; End of time series points
do it = 0, ca-1
    dat(it,:)=dat(ca,:);
    ;print("it = "+it+" "+ca)
end do

do it = ntim-ca, ntim-1
    dat(it,:)=dat(ntim-ca-1,:);
    ;print("it = "+it+" "+(ntim-ca-1))
end do

;_____writing file
system("/bin/rm -f ./variance.bin")
do it = 0, ntim-1
    fbindirwrite("./variance.bin",dat(it,:))
end do

;-----
; Spatial smoothing around 9 grids
;-----

dat_smthl = smth9_Wrap(dat, 0.5, -0.25, True) ; light smoothing
dat_smth0 = smth9_Wrap(dat, 0.5, 0, True) ; 5-point smoothing
dat_smthh = smth9_Wrap(dat, 0.5, 0.25, True) ; heavy smoothing

;_____writing file
system("/bin/rm -f ./smth.heavy.bin")
do it = 0, ntim-1

```

```

;   fbindirwrite(ofile_name,dat(it,:))
;   fbindirwrite("./smth.light.bin",dat_smthl(it,:))
;   fbindirwrite("./smth.zero.bin",dat_smth0(it,:))
      fbindirwrite("./smth.heavy.bin",dat_smthh(it,:))
end do

;-----
; Maximum latitude
;-----

dat2      = dat_smthh(:,{slat:elat},:)    ; specific area
lat2      = dat2&lat
nlat2     = dimsizes(lat2)

dat2_maxlat = dim_max_n_Wrap(dat2,1)    ; maximum lat
out        = dat2_maxlat

do it = 0, ntim-1
do i   = 0, nlon-1
  do j = 0, nlat2-1
    if( dat2(it,j,i).eq.dat2_maxlat(it,i) ) then
      reallat = lat2(j)
      out(it,i) = reallat
      ; print(it+" "+j+" "+i+" "+out(it,i))
    end if
  end do
end do
end do
end do

```

```
;____writing file
; system("/bin/rm -f ./out.bin")
; fbindirwrite("./out.bin",out(:,:))

out_mon = calculate_monthly_values (out, "avg", 0, False)
fbindirwrite("./out.mon.bin",out_mon(:,:))

printVarSummary(dat2_maxlat)
printVarSummary(out)
printVarSummary(out_mon)

end
```



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

